

Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra telekomunikační techniky

**Dělič vysokofrekvenčního radiového signálu pracující
na zadaném kmitočtu**

Antennas splitter

2015

Bc. Dominik Klvaňa

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra telekomunikační techniky

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Dominik Klvaňa**
Studijní program: N2647 Informační a komunikační technologie
Studijní obor: 2601T013 Telekomunikační technika
Téma: Dělič vysokofrekvenčního rádiového signálu pracující na zadaném kmitočtu
Antennas Splitter

Zásady pro vypracování:

Dělič (Splitter) signálu slouží k rozdělení výkonu signálu z-do dvou a více antén. Student má za úkol vypočítat a zkonstruovat toto zařízení.

Vypracovaná práce bude splňovat následující body zadání:

1. Popis funkce děliče signálu.
2. Výpočet děliče na zadaném kmitočtu.
3. Konstrukce děliče.
4. Ověření funkce měřením ve školním radioklubu OK2KQM.

Seznam doporučené odborné literatury:


BALANIS, Constantine. *Antenna Theory : Analysis and design*. 3rd edition. United States : Wiley, 2005. 1117 s. ISBN 0-471-66782-X.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

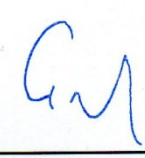
Vedoucí diplomové práce: **Ing. Marek Dvorský, Ph.D.**

Datum zadání: 01.09.2014

Datum odevzdání: 07.05.2015


doc. Ing. Miroslav Vozňák, Ph.D.
vedoucí katedry

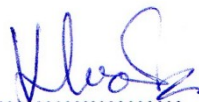



prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

V Ostravě dne: *6. května 2015*


.....
podpis studenta

Poděkování

Rád bych poděkoval Ing. Marku Dvorskému, Ph.D. za odbornou pomoc a konzultaci při vytváření této diplomové práce.

Abstrakt

Tato diplomová práce se zabývá problematikou děličů výkonu, které jsou schopné zvládnout velký přivedený výkon. Cílem je nalezení optimálního typu děliče výkonu a vhodného materiálu pro přenosové vedení, ze kterého bude dělič vyroben, tak aby splňoval stanovené podmínky pro jeho realizaci.

Klíčová slova

Bezeztrátový dělič; odporový dělič; rozptylové parametry; trubkový dělič výkonu; tříportový dělič; Wilkinsonův dělič výkonu; zkracovací součinitel koaxiálního vedení.

Abstract

Within this Diploma thesis, we deal with the issue of power splitters. Namely the power splitters suited for large power input are investigated. Aim of this work is to propose a realization of optimal power splitter, including also the discussion about the material that is suitable for transmission line. The realization have to be done under given conditions and terms.

Key words

Lossless splitter; resistive splitter; scattering parameters; tube power splitter; three-port splitter; Wilkinson power splitter; shortening coefficient of the coaxial line.

Seznam použitých symbolů

Symbol	Jednotky	Význam symbolu
a		Vstupní vlnové napětí na portech
A	mm	Vnější poloměr vnitřního vodiče
B		Odražené vlny napětí na portech
f_{GDO}	Hz	Frekvence GDO
k		Zkracovací součinitel
l	m	Délka vedení
l_e	m	Elektrická délka
l_g	m	Skutečná délka vedení
P	W	Výkon
R	Ω	Odpor
R_i	mm	Vnější poloměr vnějšího vodiče
R_o	mm	Vnitřní poloměr vnějšího vodiče
S		Rozptylový parametry
S₁₁	dB	Koeficient odrazu
S₂₁	dB	Přenos z portu 2 do portu1
S₃₁	dB	Přenos z portu 3 do portu1
U	V	Napětí
Y	S	Admitance
Z	Ω	Impedance
Z₀	Ω	Impedance portů
Z₁	Ω	Charakteristická impedance vedení
Z₁	Ω	Vstupní impedance
Z₀	Ω	Výstupní impedance
ε_r		Relativní permitivita
Φ	°	Fáze
λ_e	m	Vlnová délka

Seznam použitých zkratek

Zkratka	Význam
ADS	Advanced Design System
Cu	Měď
Freq.	Frekvence
GDO	Grid dip oscillator
IL	Vložný útlum
PE	Polyethylen
PSV	Poměr stojatých vln
PVC	Polyvinylchlorid
PTFE	Polytetrafluorethylen (Teflon)
RF	Radiová frekvence
UKV	Ultra krátké vlny
VF	Vysokofrekvenční
VNWA	Vector Network Analyzer

Obsah

Úvod.....	- 11 -
1 Dělič signálu.....	- 12 -
1.1 Základní vlastnosti děliče signálu	- 12 -
1.1.1 Rozptylové parametry	- 12 -
1.1.2 Tříportové děliče (typu T)	- 15 -
1.2 Dělič typu T.....	- 18 -
1.2.1 Bezeztrátový dělič	- 18 -
1.2.2 Odporový dělič	- 19 -
1.3 Wilkinsonův dělič výkonu	- 21 -
1.3.1 Analýza děliče	- 22 -
1.4 Nesymetrický dělič výkonu a N-vlnný Wilkinsonův dělič	- 26 -
2 Návrh, simulace a popis realizace konstrukce děliče	- 28 -
2.1 Radioamatérské pásmo.....	- 28 -
2.1.1 Frekvenční pásmo určené pro dělič signálu	- 28 -
2.1.2 70 cm pásmo.....	- 28 -
2.2 Stanovené podmínky pro návrh konstrukce	- 29 -
2.3 Wilkinsonův dělič výkonu	- 29 -
2.3.1 Typ použitého přenosového vedení obvodu.....	- 29 -
2.3.2 Zjištění zkracovacího součinitele koaxiálního vedení.....	- 29 -
2.3.3 Návrh Wilkinsonova děliče	- 31 -
2.3.4 Simulace Wilkinsonova děliče	- 32 -
2.3.5 Konstrukce děliče	- 34 -
2.4 Trubkový dělič signálu.....	- 36 -
2.4.1 Přenosové vedení obvodu děliče	- 36 -
2.4.2 Návrh trubkového děliče	- 36 -
2.4.3 Simulace	- 37 -
2.4.4 Výroba.....	- 39 -
3 Měření ověření správnosti konstrukce děliče	- 42 -
3.1 Měření v laboratoři pomocí vektorového analyzátoru	- 42 -

Použité přístroje a zařízení	- 42 -
Schéma zapojení.....	- 42 -
Postup měření.....	- 43 -
Nastavené parametry, naměřené hodnoty.....	- 43 -
3.2 Měření útlumu	- 46 -
Použité přístroje a zařízení	- 46 -
Schéma zapojení.....	- 46 -
Postup měření.....	- 46 -
Naměřené hodnoty	- 47 -
3.3 Měření trubkového děliče výkonu v radioklubu	- 49 -
Použité přístroje a zařízení	- 49 -
Schéma zapojení.....	- 49 -
Postup měření děliče v radioklubu	- 50 -
Naměřené hodnoty	- 51 -
3.4 Souhrnné vyhodnocení provedených měření	- 52 -
Závěr	- 54 -
Použitá literatura	lvi
Seznam příloh.....	lviii

Úvod

Hlavním cílem diplomové práce je realizace tříportového děliče výkonu, který bude mít jeden vstupní port a dva porty výstupní. Tento dělič bude symetricky rozdělovat přivedený výkon na vstup děliče v poměru 1:2 na výstupní porty. Zadané parametry pro realizaci jsou, že dělič musí dělit výkon na zadaném kmitočtu a to konkrétně na frekvenci 432 MHz a také musí být schopený snést přivedený výkon 500 W.

Před samotnou realizací a měřením děliče výkonu se v úvodu seznámíme se základní teorií děličů. V první části práce se budeme zabývat popisem rozptylových parametrů, rozptylovou maticí a následně popisem tříportových děličů typu T. Popíšeme si zde také tříportový bezztrátový dělič, tříportový odporový dělič a tříportový Wilkinsonův dělič.

Druhá část diplomové práce se zabývá 70 cm frekvenčním pásmem, ve kterém je určený prostor pro provozování radioamatérských služeb. Popisem radioamatérských služeb a přidělením radioamatérských služeb v 70 cm frekvenčním pásmu. Dále obsahuje návrh konstrukčního řešení děličů, simulací v programu ADS a konečnou výrobou dvou děličů výkonu, které musí splňovat zadané podmínky pro jejich realizaci. Prvním týmem děliče je Wilkinsonův dělič výkonu, který splňuje zadané podmínky. Druhý dělič výkonu splňující podmínky pro použití v radioklubu, a který byl primárním cílem naší diplomové práce je trubkový dělič výkonu. Velmi podstatnou částí při návrhu děliče je, uvědomit si to, s jakými materiály jsme schopni disponovat při následné výrobě děliče. Od toho to se pak odvíjí návrh děliče.

Třetí část se zabývá už pouze trubkovým děličem výkonu a s ním i spojené měření v laboratoři v prostorách Vysoké školy báňské. Následně byl trubkový dělič odzkoušen a odměřen v radioklubu OK2KQM & OK6A na VŠB-TUO.

1 Dělič signálu

Děliče signálu lze považovat za pasivní mikrovlnný prvek používaný v oboru radiotechniky, který nám rozděljuje výkon přivedeného signálu na vstupní port (port 1). Při použití děliče výkonu je vstupní signál rozdělen do dvou nebo více výstupních signálů s menšími výkony. Dělič může mít tři porty, čtyři porty či více portů a může být (v ideálním případě) bezztrátový. Důležitým znakem u děličů výkonu je to, že výstupní porty jsou izolovány od ostatních výstupů. To znamená, že vstupní signál na jednom z výstupů není detekovatelný na druhém výstupu. Výkonový dělič se obvykle navrhuje tak, aby výstupní signály měly výkony rozdělené na výstupních portech ve stejném dělicím poměru, tento dělič nazýváme symetrický dělič výkonu. Existují také děliče, které rozdělují výkon v nerovnoměrném poměru na výstupní porty děliče. Tento typ děličů se nazývá asymetrický dělič výkonu. Různé typy děličů nám mohou měnit signál fázového posunu o 90° či o 180° mezi jednotlivými výstupními porty.



Obrázek 1.1: *Obecné blokové schéma děliče signálu*

1.1 Základní vlastnosti děliče signálu

Vlastnosti děliče lze popsat pomocí rozptylové matice, rozptylových parametrů, odvozením a teoretickým popisem některých ze základních charakteristik tříportových děličů.

1.1.1 Rozptylové parametry

Rozptylové parametry (S-parametry) jsou široce používány v rádiových frekvencích (RF) a mikrovlnných frekvencích pro modelování komponentů, specifických komponentů a obvodů. Rozptylové parametry lze měřit pomocí analyzátorů sítě a mohou být přímo spojeny s ABCD, Z a Y-parametry používané pro analýzu obvodů. Pro obecné síť s N-porty, jak je znázorněno na Obr. 1.2, rozptylová matice je uvedena na následujících rovnicích (1.1) a (1.2).

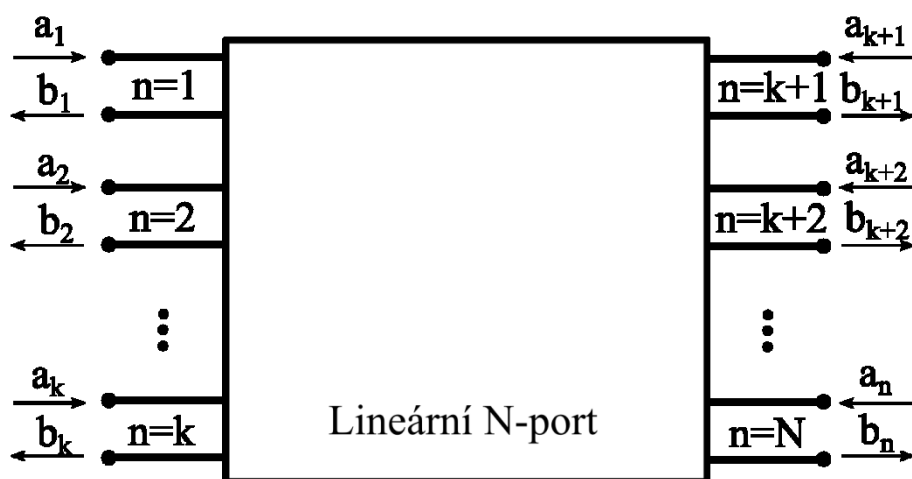
$$\begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \\ \vdots \\ b_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & \dots & S_{1N} \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} & \dots & S_{2N} \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} & \dots & S_{3N} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ S_{N1} & S_{N2} & S_{N3} & \dots & S_{NN} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ \vdots \\ a_N \end{bmatrix} \quad (1.1)$$

nebo

$$[b] = [S][a] \quad (1.2)$$

kde a_1, a_2, \dots, a_N je vstupní vlnové napětí na portech 1, 2, ..., N, respektive b_1, b_2, \dots, b_N jsou odražené vlny napětí na těchto portech. Rozptylové parametry jsou komplexní, proměnné týkající se opětovného odražení vln a vstupních vln. Rozptylové parametry mají některé zajímavé vlastnosti:

1. Pro každý uzavřený port i , $S_{ii} = 0$.
2. Pro reciproční síť, $S_{nm} = S_{mn}$.
3. Pro pasivní obvod, $|S_{nm}| \leq 1$.



Obrázek 1.2: Lineární N-port

4. Pro bezztrátovou a reciproční síť, jeden má, pro i -té porty

$$\sum_{n=1}^B |S_{ni}|^2 = \sum_{n=1}^B S_{ni} S_{ni}^* = 1 \quad (1.3)$$

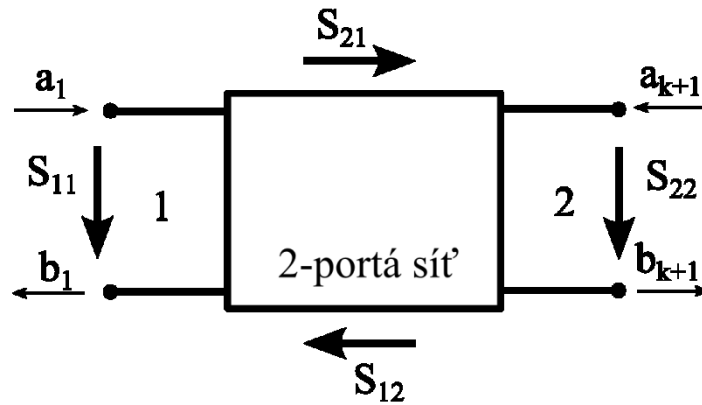
nebo

$$|S_{ni}|^2 + |S_{2i}|^2 + |S_{3i}|^2 + \dots + |S_{ii}|^2 + \dots + |S_{Ni}|^2 = 1 \quad (1.4)$$

Rovnice (1.3) uvádí, že výrobek podle některého ze sloupce rozptylové matice je konjugentní, pokud je s tímto sloupcem roven 1. Rovnice (1.3) je vzhledem k zachování výkonu bezeztrátové sítě. V rovnici (1.3) celkový výkon vstupující na i-tém portu je normalizován a stává se 1, který je roven výkonu vystupujícího na i-tém portu, plus je roven výkonu přenášeného do všech ostatních portů. Dvojbran je nejběžnější typem okruhu. U sítě dvou portů, jak je znázorněno na obr. 1.3, rozptylové parametry jsou dány rovnicemi (1.5) a (1.6). [3] [6]

$$b_1 = S_{11}a_1 + S_{12}a_2 \quad (1.5)$$

$$b_2 = S_{21}a_1 + S_{22}a_2 \quad (1.6)$$



Obrázek 1.3: Dvojbran a jeho rozptylové parametry

Rozptylové parametry mohou být definovány v následujících případech:

$$S_{11} = \left. \frac{b_1}{a_1} \right|_{a_2=0} = \Gamma_1 = \text{odrazový koeficient na port 1 s } a_2=0$$

$$S_{21} = \left. \frac{b_2}{a_1} \right|_{a_2=0} = T_{21} = \text{převodní koeficient od portu 1 do portu 2 s } a_2=0$$

$$S_{22} = \left. \frac{b_1}{a_2} \right|_{a_1=0} = \Gamma_2 = \text{odrazový koeficient na port 2 s } a_1=0$$

$$S_{12} = \left. \frac{b_1}{a_2} \right|_{a_1=0} = T_{12} = \text{převodní koeficient od portu 2 do portu 1 s } a_1=0$$

Odražené ztráty lze najít za pomoci vzorce (1.7).

$$RL = 20 \log \left| \frac{a_1}{b_1} \right| = 20 \log \left| \frac{1}{S_{21}} \right| \text{ [dB]} \quad (1.7)$$

Útlumové nebo vložené ztráty jsou dány za pomoci vzorce (1.8).

$$IL = \alpha = 20 \log \left| \frac{a_1}{b_2} \right| = 20 \log \left| \frac{1}{S_{21}} \right| \text{ [dB]} \quad (1.8)$$

Fázový posun sítě je ϕ = fáze na S_{21} .

1.1.2 Tříportové děliče (typu T)

Nejjednodušší typem děliče výkonu je dělič typu T, což je tříportový dělič se dvěma výstupy a jedním vstupem. Rozptylová matice libovolného tříportového děliče má devět nezávislých prvků jak je zobrazeno ve vzorci (1.9).

$$[S] = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} \end{bmatrix} \quad (1.9)$$

V případě, že je zařízení pasivní a neobsahuje žádné anizotropní materiály, musí to být vzájemné a jeho rozptylová matice bude symetrická ($S_{ij} = S_{ji}$). Aby nedocházelo ke ztrátám energie, je nutné mít takový dělič, který je bezztrátový a uzavřen na všech portech. Můžeme si teoreticky snadno ukázat jak na to, nicméně je reálně nemožné realizovat takový tříportový bezztrátový dělič, který je uzavřen na všech portech.

Jsou-li všechny porty uzavřené, potom $S_{ii} = 0$ a v případě, že dělič je reciproční, rozptylová matice uvedená ve vzorci (1.9) se redukuje na matici uvedenou ve vzorci (1.10).

$$[S] = \begin{bmatrix} 0 & S_{12} & S_{13} \\ S_{21} & 0 & S_{23} \\ S_{31} & S_{32} & 0 \end{bmatrix} \quad (1.10)$$

Pokud je dělič bezeztrátový, pak úspory energie vyžadují, aby rozptylová matice splňovala jednotné vlastnosti ve vzorci, což vede k následujícím podmínkám.

$$|S_{12}|^2 + |S_{13}|^2 = 1, \quad (1.11a)$$

$$|S_{12}|^2 + |S_{23}|^2 = 1, \quad (1.11b)$$

$$|S_{13}|^2 + |S_{23}|^2 = 1, \quad (1.11c)$$

$$S_{13}^* S_{23} = 0, \quad (1.11d)$$

$$S_{23}^* S_{12} = 0, \quad (1.11e)$$

$$S_{12}^* S_{13} = 0. \quad (1.11f)$$

Rovnice (1.11d) - (1.11f) ukazují, že alespoň dva ze tří parametrů (S_{12} , S_{13} , S_{23}) musí být rovny nule. Tato podmínka nebude vždy v souladu s jednou z rovnic (1.11a) - (1.11c), což znamená, že dělič se třemi porty nemůže být současně bezeztrátový, reciproční a uzavřený na všech portech. Pokud je, ale některá z těchto tří podmínek splněna, pak je dělič fyzicky realizovatelný a zařízení je možné vyrobit. [1] [2]

Rozptylová matice s odpovídající třemi porty má následující tvar uvedený ve vzorci (1.12).

$$[S] = \begin{bmatrix} 0 & S_{12} & S_{13} \\ S_{21} & 0 & S_{23} \\ S_{31} & S_{32} & 0 \end{bmatrix} \quad (1.12)$$

V případě, že je dělič bezeztrátový, $[S]$ musí být jednotné, což znamená, že musí splňovat tyto podmínky uvedené ve vzorcích (1.13a) - (1.13f).

$$S_{31}^* S_{32} = 0, \quad (1.13a)$$

$$S_{21}^* S_{23} = 0, \quad (1.13b)$$

$$S_{12}^* S_{13} = 0, \quad (1.13c)$$

$$|S_{12}|^2 + |S_{13}|^2 = 1, \quad (1.13d)$$

$$|S_{21}|^2 + |S_{23}|^2 = 1, \quad (1.13e)$$

$$|S_{31}|^2 + |S_{32}|^2 = 1. \quad (1.13f)$$

Tyto rovnice mohou být splněny jedním ze dvou způsobů uvedených ve vzorcích (1.14a) - (1.14b).

$$S_{12} = S_{23} = S_{31} = 0, |S_{21}| + |S_{32}| + |S_{131}| = 1, \quad (1.14a)$$

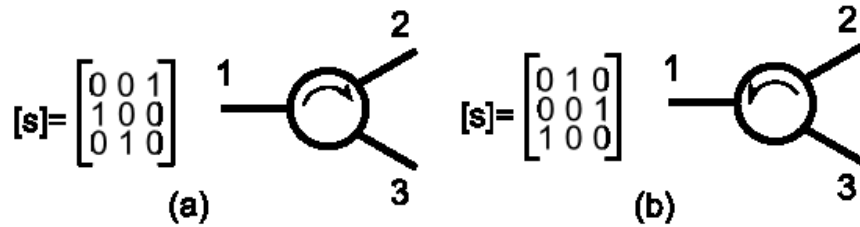
nebo

$$S_{21} = S_{32} = S_{13} = 0, |S_{12}| + |S_{23}| + |S_{31}| = 1. \quad (1.14b)$$

Tyto výsledky ukazují, že $S_{ij} \neq S_{ji}$ pro $i \neq j$, což znamená, že zařízení musí být nereciproční. Rozptylová matice pro dvě řešení (1.14) jsou uvedeny na obrázku (1.10) spolu se symboly pro dva možné typy cirkulátoru. Jediný rozdíl mezi těmito dvěma případy je ve směru toku energie mezi porty: řešení na obrázku 1.14a odpovídá cirkulátoru, které umožňuje tok energie jen z portu 1 do 2, nebo z portu 2 do 3, nebo portu 3 na 1, zatímco řešení zobrazené na obrázku 1.11b odpovídá cirkulátoru s opačným směrem toku energie.

Alternativní, bezztrátový a reciproční tříportový dělič může být fyzicky realizován tehdy, budou-li dva z jeho portů uzavřeny. Pokud porty 1 a 2 jsou uzavřeny, pak rozptylovou matici lze zapsat jako rovnici (1.15).

$$[S] = \begin{bmatrix} 0 & S_{12} & S_{13} \\ S_{21} & 0 & S_{23} \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} \end{bmatrix} \quad (1.15)$$



Obrázek 1.4: Dva typy cirkulátoru a jejich rozptylová matice. (a) Oběh ve směru hodinových ručiček, (b) oběh proti směru hodinových ručiček

Chcete-li mít bezztrátový dělič, musí být splněny tyto podmínky unitarity:

$$S_{13}^* S_{23} = 0, \quad (1.16a)$$

$$S_{12}^* S_{13} + S_{23}^* S_{33} = 0, \quad (1.16b)$$

$$S_{23}^* S_{12} + S_{33}^* S_{13} = 0, \quad (1.16c)$$

$$|S_{12}|^2 + |S_{13}|^2 = 1, \quad (1.16d)$$

$$|S_{12}|^2 + |S_{23}|^2 = 1, \quad (1.16e)$$

$$|S_{13}|^2 + |S_{23}|^2 + |S_{33}|^2 = 1. \quad (1.16f)$$

Rovnice (1.16d) a (1.16e) ukazují, že $|S_{13}| = |S_{23}|$ takže rovnice (1.16a) vede k výsledku, že $S_{13} = S_{23} = 0$. Pak $|S_{12}| = |S_{33}| = 1$. V případě, že síť se třemi porty nemá být ztrátová, může být vzájemná a uzavřená na všech portech, to je případ odporového děliče. Kromě toho, ztrátová tříportová síť může mít izolaci mezi svými výstupními porty (např., $S_{23} = S_{32} = 0$).

1.2 Dělič typu T

Dělič typu T je jednoduchý tříportový dělič, který může být použit pro rozdělení nebo kombinování výkonu a může být prakticky realizován jakéhokoliv typu přenosového vedení. Děliče zde uvedené jsou popsány bez ztrát vzniklých na přenosovém vedení, bezeztrátové děliče. Tento typ děliče může být bezeztrátový, ale ne současně uzavřený na všech portech. Dále bude následovat popis odporového děliče, který může být uzavřený na všech portech, ale nemůže být bezeztrátový. [1] [2]

1.2.1 Bezeztrátový dělič

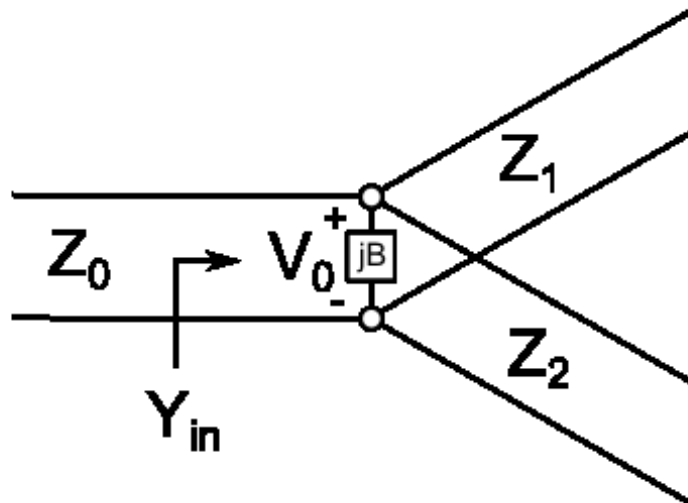
Bezeztrátový dělič typu T lze vytvořit spojením tří vedení, jak je znázorněno na obrázku 1.5. Obecně platí, že mohou být rozptylová pole vyššího řádu a režimy spojené s diskontinuitou na spojce, což vede k akumulování energie, která může být příčinou koncentrování susceptance, B . Aby dělič mohl být uzavřen na vstupu, charakteristická impedance Z_0 musí splňovat vzorec (1.17). [1] [2]

$$Y_{in} = jB + \frac{1}{Z_1} + \frac{1}{Z_2} = \frac{1}{Z_0} \quad (1.17)$$

Pokud se předpokládá, že přenosové vedení děliče jsou bezeztrátové (nebo nízkoztrátové), pak charakteristická impedance je skutečná. Budeme-li předpokládat, že $B = 0$, pak vzorec (1.17) redukuje na rovnici (1.18).

$$\frac{1}{Z_0} = \frac{1}{Z_1} + \frac{1}{Z_2} \quad (1.18)$$

V praxi to znamená, když B není zanedbatelné, tak pak nějakým typ kompenzace nespojitosti nebo reaktivního ladění může být obvykle použito pro zrušení této susceptance, alespoň v úzkém kmitočtovém rozsahu.

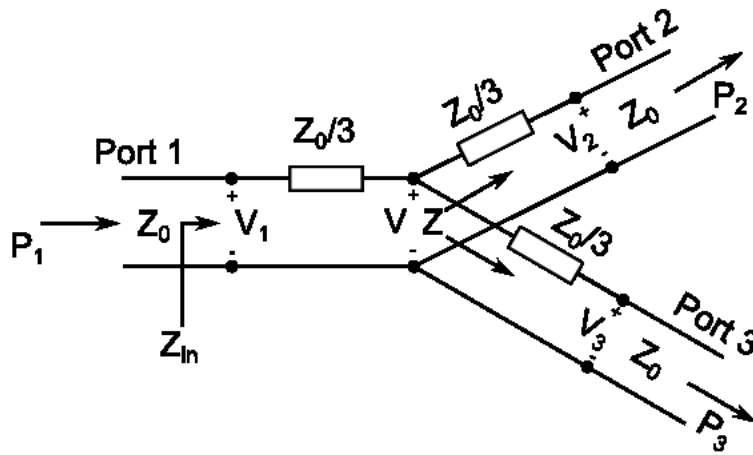


Obrázek 1.5: Přenosový model bezztrátového děliče typu T

Výstupní impedance Z_1 a Z_2 mohou být vybrány tak, aby poskytovaly různý poměr dělení výkonu. Tedy $50\ \Omega$ pro vstupní vedení, 3 dB (stejný poměr) dělič výkonu může být vyroben s použitím dvou $100\ \Omega$ výstupním vedením. Pokud je to nutné, mohou být čtvrtvlnné transformátory použity tak, aby výstupní impedance byla změněna zpět na požadovanou úroveň. Pokud výstupní vedení bude uzavřené, bude uzavřen také vstup. Z toho důvodu tam nebude potřebná izolace mezi oběma výstupními porty, nicméně tam bude neshoda na výstupních portech.[4]

1.2.2 Odporový dělič

Je-li dělič tříportový, obsahuje ztrátové složky, které mohou být obsazeny na všech portech i když výstupní dva porty nejsou izolovány. Obvod takového děliče je znázorněný na obrázku 1.6 za použití soustředěných odporů. Jedná se o znázornění děliče, který má rovnoměrné rozdělení (-3 dB), ale je také možné realizovat dělič s nerovnoměrným poměrem dělení výkonu. [1]



Obrázek 1.6: Symetrický tříporty odporový dělič výkonu

Odporový dělič znázorněný na obrázku 1.6 lze snadno analyzovat pomocí teorie obvodů. Za předpokladu, že všechny porty jsou ukončeny charakteristickou impedancí Z_0 , impedance Z směřující do odporu $Z_0/3$, po kterém následuje ukončení výstupní linky, která je uvedena v rovnici (1.19).

$$Z = \frac{Z_0}{3} + Z_0 = \frac{4Z_0}{3}. \quad (1.19)$$

Následně vstupní impedance děliče uvedená ve vzorci (1.20)

$$Z_{in} = \frac{Z_0}{3} + \frac{2Z_0}{3} = Z_0. \quad (1.20)$$

Což ukazuje, že vstup je uzavřen na vstupním vedení. Vzhledem k tomu, že je dělič symetrický na všech třech portech, poté jsou také všechny výstupní porty uzavřeny. Tedy $S_{11} = S_{22} = S_{33} = 0$. V případě, že napětí na portu 1 je V_1 , pak dělení napětí V ve středu děliče je uvedeno ve vzorci (1.21)

$$V = V_1 \frac{\frac{2Z_0}{3}}{\frac{Z_0}{3} + \frac{2Z_0}{3}} = \frac{2}{3} V_1, \quad (1.21)$$

a výstupní napětí jsou opět rozdělena podle rovnice (1.22),

$$V_2 = V_3 = V \frac{Z_0}{Z_0 + \frac{Z_0}{3}} = \frac{3}{4} V = \frac{3}{4} V_1. \quad (1.22)$$

Takže, $S_{21} = S_{31} = S_{23} = 1/2$, proto výstupní výkony jsou o 6 dB pod úrovní vstupního napájecího výkonu. Dělič je reciproční, rozptyl matice je symetrický a to může být psáno pomocí vzorce (1.23).

$$[S] = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 0 \end{bmatrix}. \quad (1.23)$$

Výkon dodávaný na vstup děliče je uveden pomocí rovnice (1.24)

$$P_{in} = \frac{1}{2} \frac{V_1^2}{Z_0}, \quad (1.24)$$

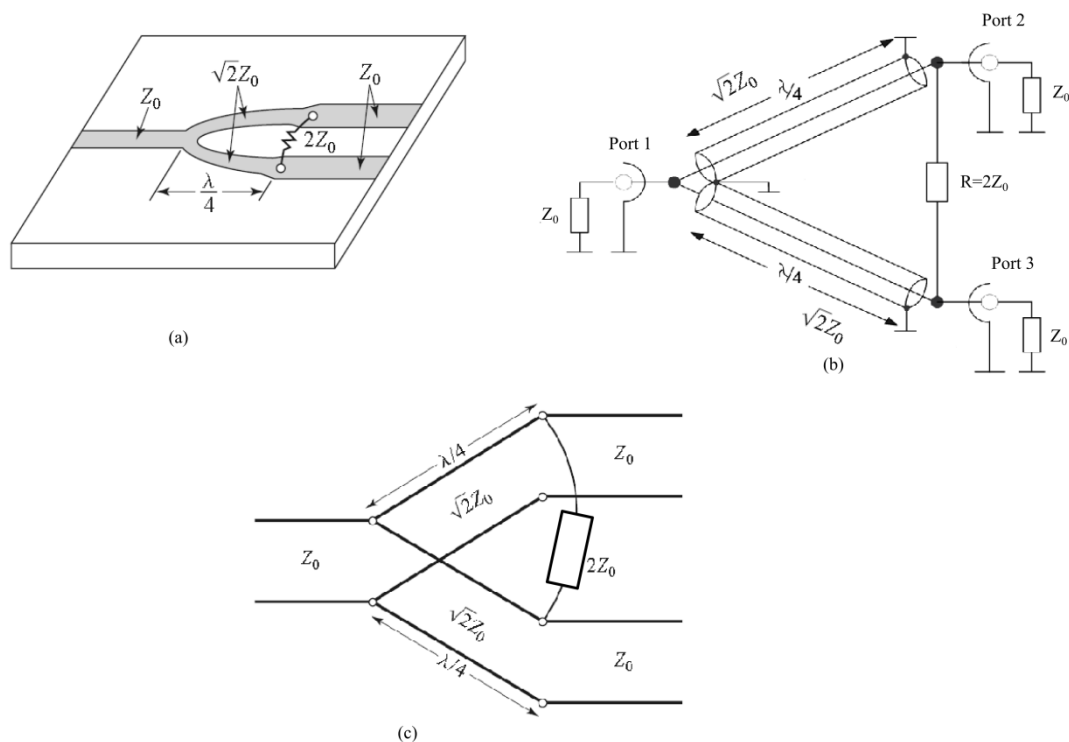
zatímco výstupní výkony jsou zapsány rovnicí (1.25)

$$P_2 = P_3 = \frac{1}{2} \frac{(\frac{1}{2} V_1)^2}{Z_0} = \frac{1}{8} \frac{V_1^2}{Z_0} = \frac{1}{2} P_{in}, \quad (1.25)$$

což ukazuje, že polovina dodávané energie je rozptýlena na odporech.

1.3 Wilkinsonův dělič výkonu

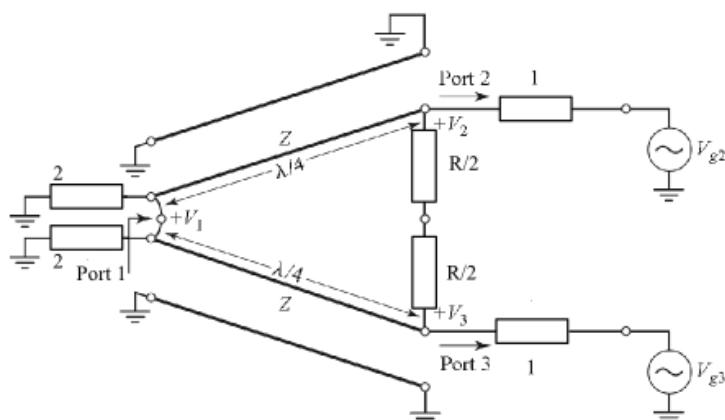
Bezeztrátový dělič typu T má tu nevýhodu, že není uzavřen na všech portech a také nemá izolaci mezi výstupními porty. Odporový dělič může být uzavřen na všech portech, i když to není bezeztrátové, ale také nebylo dosaženo izolace mezi výstupními porty. Z kapitoly 1.1, však víme, že tříportový ztrátový dělič může mít všechny porty uzavřené s izolací mezi výstupními porty. Wilkinsonův dělič výkonu, je dělič s užitečnou vlastností uvedeného bezeztrátového děliče, právě když jsou výstupní porty uzavřeny, což znamená, že pouze odrážený výkon z výstupních portů je rozptýlený. Wilkinsonův dělič výkonu může být navržen tak, že na výstupních portech může být rozdílný výkon. Nejdříve se budeme zabývat rovnoměrným rozdělením výkonu. Tento dělič je často vyráběn v mikropáskové nebo páskové formě vedení, jak je znázorněno na obrázku 1.7a. Také je možné navrhnout a realizovat tento dělič pomocí koaxiálního vedení, jak je znázorněno na obrázku 1.7b. Odpovídající přenosové vedení obvodu je uvedeno na obrázku 1.7c. [1] [2] [7] [9]



Obrázek 1.7: Symetrický Wilkinsonův dělič výkonu. (a) v mikropáskovém tvaru, (b) z koaxialního vedení, (c) ekvivalentní obvod přenosové linky

1.3.1 Analýza děliče

Pro jednoduchost lze normalizovat všechny impedance na charakteristické impedance Z_0 a překreslit obvod na obr. 1.7c s generátory napětí na výstupních portech, jak je znázorněno na obrázku 1.8. Tento dělič je popsán ve formě, která je symetrická v celé střední rovině. Dva zdrojové odpory normalizované hodnoty 2 spojené paralelně, čímž se získá odpor s normalizovanou hodnotou 1, což představuje impedanci odpovídajícího zdroje. Čtvrtvlnné vedení má normalizovanou charakteristickou impedanci Z a zkratový odpor má normalizovanou hodnotu R a pro symetrický dělič výkonu by měly být hodnoty $Z = \sqrt{2} \cdot Z_0$ a $R = 2 \cdot Z_0$, jak je uvedeno na obrázku 1.7. [1] [2] [7] [9]

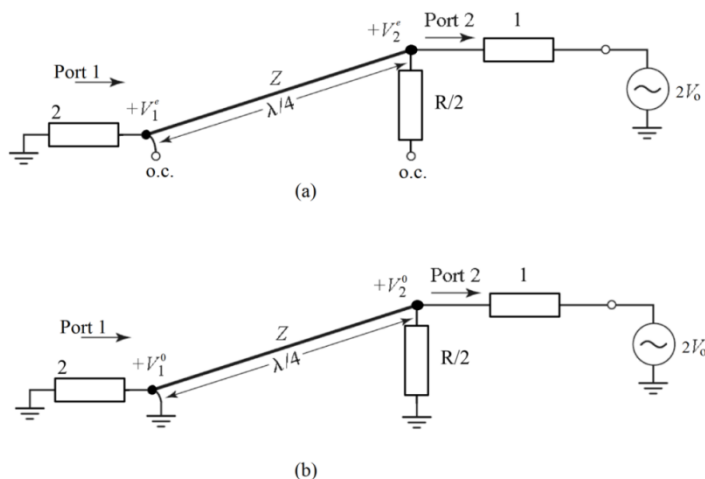


Obrázek 1.8: Okruh Wilkinsonova děliče výkonu v normalizovaném a symetrickém tvaru

Nyní si definujeme dva samostatné režimy buzení pro obvod z obrázku 1.8. Sudý vid, kde $V_{g2} = V_{g3} = 2V_0$ a lichý vid, kde $V_{g2} = -V_{g3} = 2V_0$. Skládání ze dvou vidů účinně vytváří syntézu excitace $V_{g2} = 4V_0$ a $V_{g3} = 0$, z nichž můžeme nalézt rozptylové parametry děliče.

Sudý vid: pro sudý vid buzení platí že $V_{g2} = V_{g3} = 2V_0$, takže $V_2^e = V_3^e$ a proto proud neprotéká odpory $R/2$ nebo mezi zkratovanými vstupy dvou přenosových vedení na port 1. Pak můžeme rozpůlit dělič z obrázku 1.8 s otevřeným obvodem v těchto místech a získáme obvod z obrázku 1.9a (uzemněná část $\lambda / 4$ vedení není zobrazena). Pak se výkon směřuje na port 2, kde se nachází impedance Z_{in}^e která se určí rovnicí (1.26). [1]

$$Z_{in}^e = \frac{Z^2}{2} \quad (1.26)$$



Obrázek 1.9: Bisekce obvodu z obrázku 1.8. (a) sudý vid excitace, (b) lichý vid excitace

Protože přenosové vedení vypadá jako transformátor čtvrtvlnný. Tudiž, je-li $Z=\sqrt{2}$, port 2 bude uzavřen pro sudý vid excitace, pak $V_2^e=V_0$ poněvadž $Z_{in}^e = 1$. Odpor $R/2$ není potřebný, protože v tomto případě je jeden konec otevřený. Dále jsme odvodili V_1^e z rovnice přenosového vedení. Necháme-li $x = 0$ na portu 1 a $x = -\lambda / 4$ na portu 2, můžeme popsat napětí na úseku přenosového vedení jako rovnici (1.27)

$$V(x) = V^+(e^{-j\beta x} + \Gamma e^{-j\beta x}). \quad (1.27)$$

Poté rovnice (1.28) a (1.29) jsou zapsány

$$V_2^e = V\left(-\frac{\lambda}{4}\right) = jV^+(1 - \Gamma) = V_0, \quad (1.28)$$

$$V_1^e = V(0) = V^+(1 + \Gamma) = jV_0 \frac{\Gamma+1}{\Gamma-1}. \quad (1.29)$$

Koeficient odrazu Γ , který je na portu 1 má obrácený odpor normalizované hodnoty 2, takže

$$\Gamma = \frac{2-\sqrt{2}}{2+\sqrt{2}}, \quad (1.30)$$

$$V_1^e = jV_0 \sqrt{2}. \quad (1.31)$$

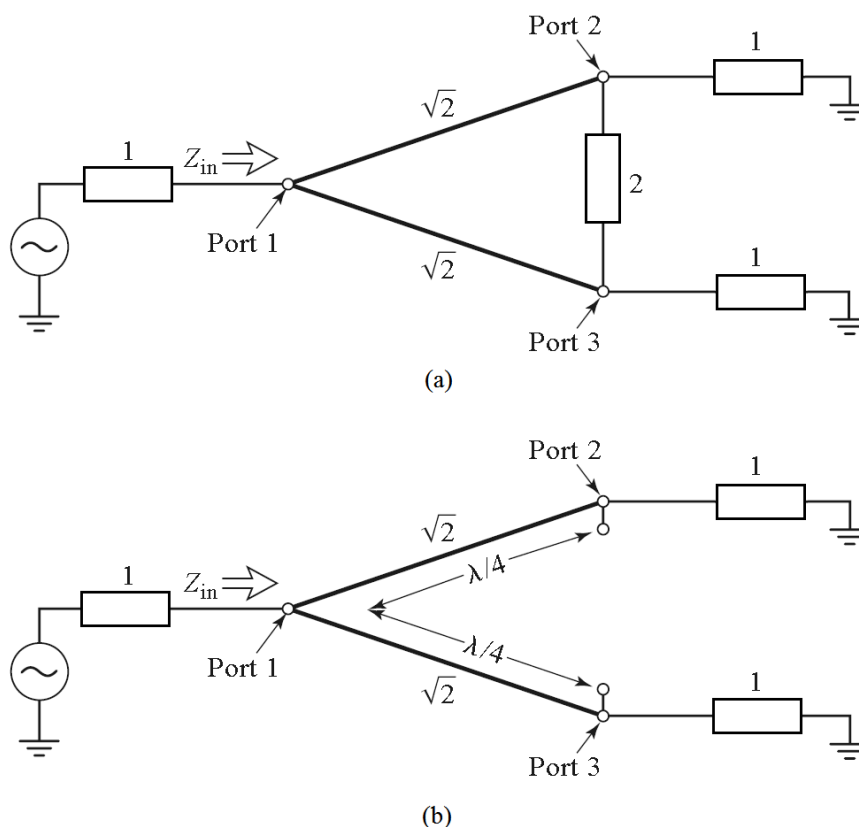
Lichý vid: pro zvláštní režimu buzení, $V_{g2} = -V_{g3} = 2V_0$ a $V_2^0 = -V_3^0$ je nulové napětí pro polovinu obvodu na obrázku 1.8. Tento obvod můžeme rozdělit na polovinu, když je obvod uzemněn ve dvou bodech na jeho střední části děliče znázorněném na obr 1.9b. Při směru do portu 2 vidíme impedanci na $R/2$, protože paralelně připojená přenosová vedení jsou délky $\lambda/4$ a jsou zkratované na portu 1, a proto se obvod jeví jako otevřený okruh na portu 2. V důsledku toho bude port 2 uzavřen pro excitace sudý vid, pokud zvolíme $R = 2$. Potom $V_2^0 = -V_0$ a $V_1^0 = 0$. Pro tento způsob excitace je veškerý výkon dodán do odporu $R/2$, tedy žádný výkon nejde do portu 1. [1]

Konečně můžeme vyřešit vstupní impedanci na portu 1 Wilkinsonova děliče, kdy porty 2 a 3 jsou zatíženy. Výsledný obvod je znázorněn na obr 1.10a, kde je vidět, že je to podobné jako sudý vid excitace od $V_2 = V_3$. Odporem normalizované hodnoty 2 neprotéká žádný proud, takže mohou být odstraněny, obvod podle obrázku 1.10b. Pak je zde paralelní spojení dvou čtvrtvlnných transformačních vedení ukončených zátěží (normalizovanou). Vstupní impedance Z_{in} je uvedena ve vzorci (1.32)

$$Z_{in} = \frac{1}{2}(\sqrt{2})^2 = 1. \quad (1.32)$$

V souhrnu lze stanovit následující rozptylové parametry pro Wilkinsonův dělič:

$$\begin{aligned}
 S_{11} &= 0 && (Z_{\text{in}}=1 \text{ do portu 1}) \\
 S_{22} = S_{33} &= 0 && (\text{porty 2 a 3 uzavřeny pro lichá a sudý vid}) \\
 S_{12} = S_{21} &= V_1^e \frac{V_1^e - V_1^0}{V_2^e + V_2^0} = -j/\sqrt{2} && (\text{symetrické vzhledem k reciprocitě}) \\
 S_{13} = S_{31} &= -j/\sqrt{2} && (\text{symetrie portů 2 a 3}) \\
 S_{23} = S_{32} &= 0 && (\text{v důsledku zkratu nebo na půl otevřený})
 \end{aligned}$$



Obrázek 1.10: Analýza Wilkinsonova děliče S_{11} . (a) ukončený Wilkinsonův dělič, (b) rozpůlený okruh v (a)

Předchozí vzorec pro S_{12} platí pro všechny porty, které jsou ukončeny přizpůsobenou zátěží. Když je dělič zatížen na portu 1 a výstupní porty jsou uzavřeny, výkon není rozptýlený na odporu. Proto je dělič bezztrátový, když jsou výstupní porty uzavřeny, tak pouze odražený výkon z portů 2 nebo 3 je rozptýlen na odporu. Vzhledem k tomu, $S_{23} = S_{32} = 0$, porty 2 a 3 jsou izolovány.

1.4 Nesymetrický dělič výkonu a N-vlnný Wilkinsonův dělič

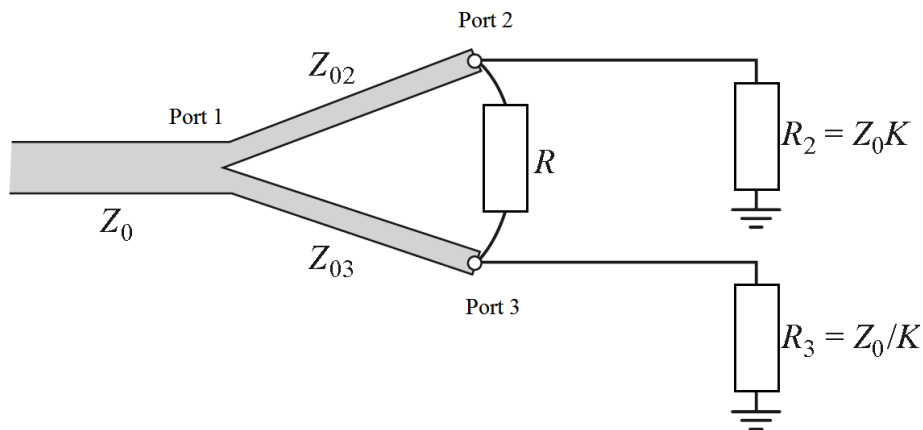
Wilkinsonův dělič výkonu můžeme vyrobit také s nerovnoměrným dělením výkonu. Ukázka návrhu nesymetrického děliče v podobě mikropáskového vedení je znázorněna na obrázku 1.11. V případě, že poměr výkonu mezi porty 2 a 3 je $K^2 = P_3 / P_2$, pak platí následující návrhové rovnice (1.33), (1.34) a (1.35).

$$Z_{03} = Z_0 \sqrt{\frac{1+K^2}{K^3}} \quad (1.33)$$

$$Z_{02} = K^2 Z_{03} = \sqrt{K(1+K^2)} \quad (1.34)$$

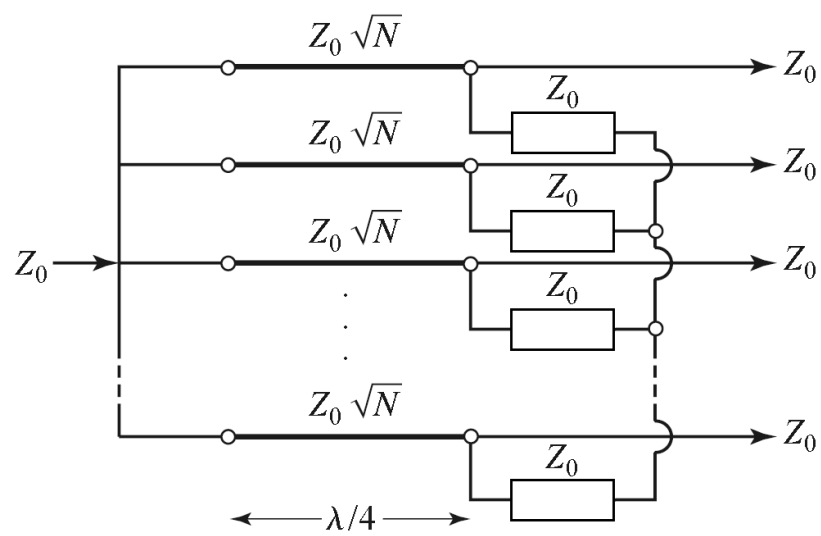
$$R = Z_0 \left(K + \frac{1}{K} \right) \quad (1.35)$$

Výše uvedené výsledky redukuje typ rovnoměrného rozdělení pro $K = 1$. Také výstupní vedení jsou přizpůsobeny impedancí $R_2 = Z_0 K$ a $R_3 = Z_0 / K$, na rozdíl od impedance Z_0 , odpovídající transformátory mohou být použity pro transformaci těchto výstupních impedancí.



Obrázek 1.11: *Wilkinsonův dělič výkonu ve mikropáskové formě s nerovnoměrným poměrem dělení výkonu*

Wilkinsonův dělič může být také zobecněn na N-vlnný dělič, jak je znázorněno na obrázku 1.12. Tento obvod může být uzavřen na všech portech s izolací mezi všemi porty. Nevýhodou však je skutečnost, že dělič vyžaduje přechody pro odpory pro $N \geq 3$, což dělá dělič obtížným na zhotovení v planární formě. Wilkinsonův dělič může být také vyroben s odstupňovanými více částmi, pro zvýšení šířky pásma.



Obrázek 1.12: N -vlnný, symetrický Wilkinsonův dělič výkonu

2 Návrh, simulace a popis realizace konstrukce děliče

Existuje mnoho různých typů děličů výkonu, které mohly být použity pro naši potřebu realizace děliče. Tato kapitola se zabývá radioamatérským pásmem, ve kterém pracuje dělič výkonu, návrhem konstrukce, simulací a popisem výroby dvou typů děličů, které splňují naše podmínky pro realizaci. Jedná se o Wilkinsonův dělič realizovaný z koaxiálního vedení a o druhý dělič, který si popíšeme jako trubkový dělič výkonu, které je primárním cílem této diplomové práce.

2.1 Radioamatérské pásmo

Radioamatérská pásma jsou určena v rozmezí vln pro nekomerční použití, což znamená, že na těchto vlnách provozují radiokomunikační služby určené pro sebevzdělávání, technická studia prováděná amatéry, vzájemná radiová spojení atd.

2.1.1 Frekvenční pásmo určené pro dělič signálu

Dělič vysokofrekvenčního radiového signálu, který budeme navrhovat a následně měřit má pracovat na frekvenci 432 MHz (70 cm pásmo). Tato frekvence, na které má dělič pracovat, spadá do oblasti ultrakrátkých vln (UKV). Frekvenční pásmo 70 cm, do kterého spadá tato frekvence, se nachází v pásmu vyhraněném pro radioamatérské použití.

2.1.2 70 cm pásmo

Sedmdesát centimetrové (70 cm) pásmo má šířku pásma 10 MHz a začíná na frekvenci 430 MHz a končí na frekvenci 440 MHz.

Toto frekvenční pásmo je zvláště důležité pro amatérské služby. Je to nejnižší frekvenční pásmo, ve kterém mohou konvenční amatéři používat rychlé skenování televize (emisní 6M00C3F) a další emise s podobnými šířkami pásma. Pásmo poskytuje spolehlivou místní hlasovou a datovou komunikaci, zatímco ve stejnou dobu poskytuje příležitost k experimentování s různými formami troposférické komunikace Země-Měsíc-Země (EME).

Družicové amatérské služby se do značné míry opírají o dílčí pásmo 435-438 MHz, což v současné době je pouze sestupný směr amatérská aplikace přiřazující se mezi 146 MHz a 2,4 GHz. Vzhledem k vytěsňování stávajícího pásma 435-438 MHz s bezpilotními amatérskými satelity a posádkou kosmické stanice, je žádoucí rozšířit pásmo na 435-440 MHz.

Vzhledem k tomu, že amatéři usilující o různé provozní zájmy v tomto pásmu, musí dodržovat dohody o sdílení mezi sebou na základě frekvencí, času a geografie. Směrnice pro anténní pole jsou praktické pro mnoho aplikací a usnadní sdílení. Sdílení s dalšími službami mohou přinést další omezení, které mohou vést k omezení amatérského provozu v závislosti na jiné službě. Pro usnadnění mezinárodní komunikace a experimentování je velmi žádoucí, aby jak pro amatéry, tak pro družicové amatérské služby ve všech zemích, měli přístup k běžnému, exkluzivnímu kmitočtovému přidělu, bez rušení od jiných služeb a od omezení, které mají chránit další služby před rušením.

2.2 Stanovené podmínky pro návrh konstrukce

Pro návrh děliče byly stanoveny podmínky, které by měl dělič výkonu splňovat. Jako první podmínka byla, že dělič musí výkon dělit symetricky a to v poměru 1:2 na zadané frekvenci 432 MHz. Dělič bude mít jeden vstupní port a dva výstupní porty. Na vstupu i výstupech bude reálná charakteristická impedance $50\ \Omega$, díky které lze připojit $50\ \Omega$ koaxiální vedení. Další podmínkou bylo, že dělič musí zvládat velký výkon, který bude přiveden na vstupní port. Byl požadován výkon 500 W. Nejvyšší hodnota PSV (poměr stojatých vln), která bude změřena na vstupním portu, pro kterou bude dělič ještě použitelný je 1,50.

2.3 Wilkinsonův dělič výkonu

2.3.1 Typ použitého přenosového vedení obvodu

Wilkinsonův dělič je pasivní vysokofrekvenční n-bran s koaxiálními vývody. V tomto případě bude dělič výkonu konkrétně tvořen třemi porty, které budou realizovány jedním vstupem nebo-li portem 1 a dvěma výstupy, které budeme nazývat porty 2 a 3. Vstupní výkon bude rovnoměrně rozdělen do dvou výkonů se stejnou amplitudou a fází.

Wilkinsonův dělič může být navržen a následně realizovat několika způsoby. První způsob je realizován pomocí vyrobeného plošného spoje, který bude mít dielektrikum z polytetrafluoroethylene (PTFE), nebo-li z teflonu. Běžně používaný materiál dielektrika pro výrobu plošných spojů je značený jako FR4 (tkanina ze skelných vláken sycená epoxidovou pryskyřicí), známy v ČR jako Cuprexit nemohl být použit z důvodu velkého výkonu a možného průrazu dielektrika či shoření desky. Z důvodu špatného pořízení vhodné destička z PTFE bylo rozhodnuto realizovat Wilkinsonův dělič pomocí druhého způsobu realizace.

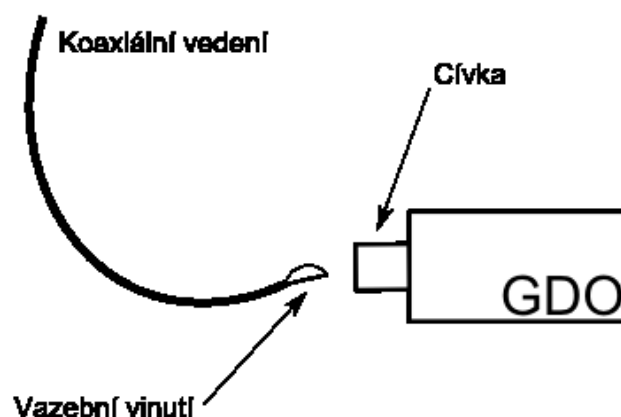
Druhý způsob realizace Wilkinsonova děliče je použití koaxiálního vedení většího průměru vnitřního vodiče, který vydrží větší výkon. Proto byl konkrétně zvolen tip koaxiálního vedení označovaný jako PRG 11 CU PVC.

2.3.2 Zjištění zkracovacího součinitele koaxiálního vedení

Pro vypočtení potřebné délky koaxiálního vedení potřebného pro návrh Wilkinsonova děliče výkonu je zapotřebí zjistit pomocí měření a výpočtu některých parametrů našeho koaxiálního vedení (PRG 11 CU PVC.), které budou použity pro návrh děliče. Pomocí tohoto měření se určí zkracovací součinitel koaxiálního vedení a hodnota dielektrika. [5]

Měřicí přístroje a nářadí, schéma

- Měřič rezonance Tesla BM 342A (Cívka: frek. rozsah GDO 27-40 MHz).
- MFJ HF/VHF SWR ANALYZER model MFJ - 259B.
- Metr, kleště, pájka, páječka, koaxiální vedení PRG 11 CU PVC.



Obrázek 2.1: Schéma měření zkracovacího součinitele

Postup měření

Jeden konec koaxiálního vedení PRG 11 CU PVC byl odizolován, vnější vodič byl zakroucen a nechán dvakrát delší než vnitřní vodič. Vnější vodič byl následně připájen k vnitřnímu vodiči a tím vzniklo vazební vinutí na jednom konci vedení. Druhý konec vedení se nechal otevřený. Vedení s otevřeným jedním koncem, detekuje tzv. čtvrtvlnnou rezonanci. Následně bylo provedeno měření skutečné délky vedení l_g a vazebního vinutí za pomoci metru. Pak bylo zjištěno, z katalogového listu, pro měřené vedení teoretický zkracovací součinitel k a spočítala se předpokládaná elektrická délka l_e viz vzorec (2.1). Následně byl zvolen vhodný frekvenční rozsah GDO (cívky) a to se zjistilo pomocí výpočtu f_{GDO} , který je uveden ve vzoreci (2.2). Konec vedení, na kterém je vazební vinutí, bylo přiloženo k cívce GDO (Grid dip oscillator) měřiči a nastavoval se tak dlouho, dokud se neobjevila kmitná, která signalizovala odsátí VF energie z oscilátoru GDO. Když byl nalezen čtvrtvlnný rezonanční kmitočet, zmenšila se vazba mezi vedením a měřičem GDO, tak aby se určil rezonanční kmitočet co nejpřesněji. Odečtením přesného kmitočtu f_e se provedlo pomocí čítače. Jako další se vypočetla ze zjištěného kmitočtu hodnota elektrické rezonanční vlnové délky λ_e podle vzorce (2.3). Předposlední výpočet bylo určení skutečné elektrické délky l_e za použití vzorečku (2.4). Poslední dva výpočty byly požadovány hodnoty zkracovacího součinitele a dielektrika koaxiálního vedení. Tyto výpočty byly provedeny za pomoci rovnic (2.5) a (2.6). Veškeré naměřené, vypočtené či vypsane hodnoty z katalogového listu jsou uvedené v tabulce 2.1.

Naměření a vypočtené hodnot, výpočty

Tabulka 2.1: Naměřené a vypočtené parametry koaxiálního vedení PRG 11 CU PVC

Veličina	Hodnota
Předpokládaná l_e	2,3277694 m
l_g	1,534 m
k (zadáno / vypočteno)	0,659 / 0,805064
f_{GDO}	32,219687 MHz
ϵ_r	1,54
Vypočtené l_e	1,9054394 m
λ_e	7,6217576 m

$$l_e = \frac{l_g}{k} = \frac{1,534}{0,659} = 2,3277694 \text{ [m]} \quad (2.1)$$

$$f_{GDO} \leq \frac{300}{4 \times l_e} = \frac{300}{4 \times 2,3277694} = 32,219687 \text{ [MHz; m]} \quad (2.2)$$

$$\lambda_e = \frac{300}{f_e} = \frac{300}{39,361} = 7,6217576 \text{ [m; MHz]} \quad (2.3)$$

$$l_e = \frac{\lambda_e}{4} = \frac{7,6217576}{39,361} = 1,905439 \text{ [m]} \quad (2.4)$$

$$k = \frac{l_g}{l_e} = \frac{1,534}{1,90543941} = 0,805064 \quad (2.5)$$

$$\epsilon_r = \frac{1}{k^2} = 1,54 \quad (2.6)$$

2.3.3 Návrh Wilkinsonova děliče

Pro realizaci symetrického Wilkinsonova děliče byly použité dvě čtvrtvlnné koaxiální vedení a jejich délka se vypočítala pomocí vzorce (2.10). Tato vedení jsou na jedné straně děliče paralelně spojené v jednom bodě a jejich charakteristická impedance je Z_1 , která je vypočtena rovnicí (2.7). Tato část děliče se nazývá impedanční transformátor, neboť přizpůsobuje výstupní impedanci vůči a vstupní impedanci Z_0 . Dále je dělič tvořen rezistorem, který propojuje obě dvě výstupní vedení a ten má velikost odporu vypočítanou podle vzorce (2.8), takto se získá vysoká izolace mezi výstupy. [12]

$$Z_1 = \sqrt{2Z_0Z_0} = \sqrt{2}Z_0 = \sqrt{2} \cdot 50 = 70,71 \Omega \quad (2.7)$$

$$R = 2Z_0 = 2 \cdot 50 = 100 \Omega \quad (2.8)$$

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{300 \cdot 10^6}{432 \cdot 10^6} = 0,695 \text{ m} \quad (2.9)$$

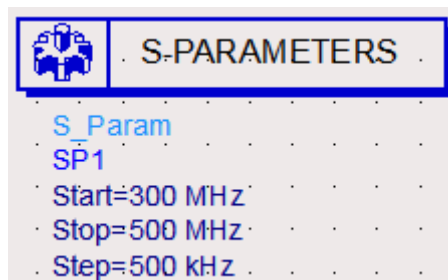
$$l = \frac{c \cdot k}{4 \cdot f} = \frac{300 \cdot 10^6 \cdot 0,8051}{4 \cdot 432 \cdot 10^6} = 0,140 \text{ m} \quad (2.10)$$

2.3.4 Simulace Wilkinsonova děliče

Simulace děliče probíhala v programu Advanced Design Systém(ADS). ADS je elektronicky navrhovací program od firmy Keysight Technologies. Tento program poskytuje integrované vývojové prostředí pro návrhy elektronických výrobků, RF zařízení, satelitní komunikace, bezdrátové sítě a mnoho dalšího. [8]

Nastavené parametry pro simulaci děliče

Po spuštění programu bylo nutno jako první krok vytvořit a uložit pracovní stanici pro celý projekt. V této pracovní stanici se poté otevřelo pracovní okno, kde se vytvořil návrh schématu Wilkinsonova děliče výkonu. Schéma děliče výkonu obsahuje tři zakončovací impedance portů děliče, které nám nahrazují vedení připojené na dělič. Každá zakončovací impedance má hodnotu impedance 50 Ω. Samotný Wilkinsonův dělič signálu je ve schématu uveden, jako dvě koaxiální vedení s určitými parametry, které jsou uvedené v tabulce 2.2. Vstupní port Wilkinsonova děliče je připojen na dva konce koaxiálních vedení spojených v jednom bodě. Výstupní porty jsou každý zvlášť připojeny ke konci jednoho koaxiálního vedení. Koaxiální vedení na stranách, kde se nacházejí výstupní porty, jsou propojeny rezistorem, který má hodnotu odporu R=100 Ω. Následně byly propojené na všechny porty děliče zakončovacími impedancemi, které jsou připojené k uzemnění. Jako poslední věc byl v návrhu simulace nastaven rozsah frekvencí, na kterém se dělič v simulaci odměřil za použití rozptylových parametrů. Nastavení je zobrazeno na obrázku 2.2.



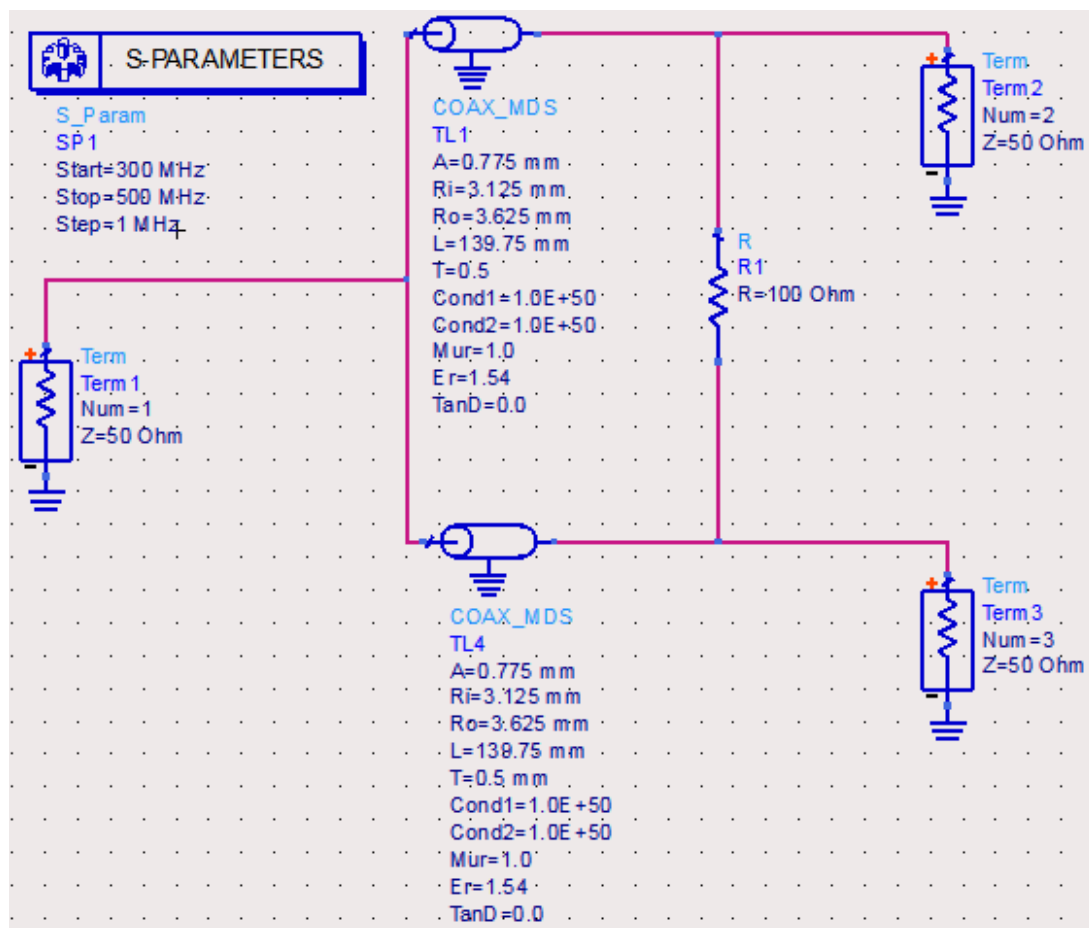
Obrázek 2.2: *Nastavení frekvenčního rozsahu simulace děliče*

Po spuštění simulace navrhnutého obvodu děliče výkonu a po provedení všech výpočtu se otevřelo další nové okno, kde se zvolí typ grafu a rozptylové parametry děliče signálu, které chceme zobrazit v grafu. Posledním krokem je nastavení ukazatele do grafu pro lepší zjištění a zobrazení hodnot na křivkách v grafu.

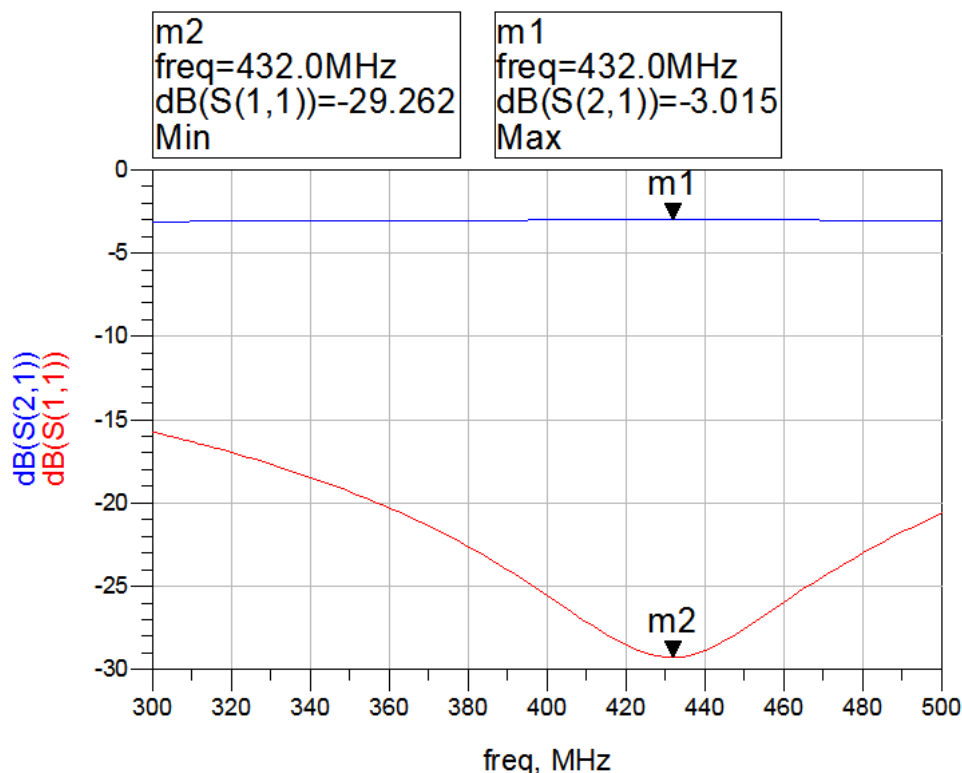
Tabulka 2.2: Nastavené parametry koaxiálního vedení Wilkinsonova děliče výkonu

Název	Skratka	Hodnota
Vnější poloměr vnitřního vodiče	A	0,775 [mm]
Vnější poloměr vnějšího vodiče	Ri	3,125 [mm]
Vnitřní poloměr vnějšího vodiče	Ro	3,625 [mm]
Délka vnitřního vedení	L	139,75 [mm]
Dielektrikum	Er	1,54[-]

2.3.4.1 Simulace



Obrázek 2.3: Schéma zapojení obvodu v programu ADS pro simulaci děliče



Obrázek 2.4: Výsledný graf simulace rozptylových parametrů S_{21} a S_{11} Wilkinsonova děliče výkonu v programu ADS

Na grafu ze simulace Wilkinsonova děliče výkonu v programu ADS jsou vidět dvě křivky. Modrá křivka zobrazuje parametr S_{21} , který určuje útlum (přenos) mezi výstupním a vstupním portem (porty 2 a 1). Pokles této křivky o -3 dB znamená, že pokles výkonu na děliči mezi porty 2 a 1 je 50 %, což splňuje požadavek na to, aby dělič dělil výkon v symetrickém poměru 1:2. Jelikož je dělič symetrický, tak úplně stejná křivka bude zobrazovat rozptylový parametr S_{31} . Červená křivka znázorňuje rozptylový parametr S_{11} , což je vlastně koeficient odrazu a ukazuje nám frekvenci, na které nám nejlépe dělí navrhnutý Wilkinsonův dělič.

2.3.5 Konstrukce děliče

V této části diplomové práce je popis veškerých součástí, které jsou zapotřebí k výrobě a samotný popis realizace Wilkinsonova děliče výkonu.

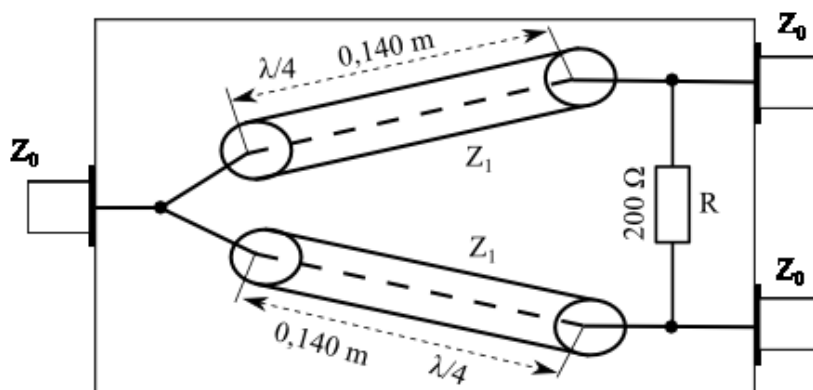
Materiál použité k výrobě

- Koaxiální vedení PRG11C4 1.55/7.25 PVC 12 EN50117-2-4 Class A 0509
- Tři konektory (UHF/N)
- Rezistor s odporem 100 Ω a se ztrátovým výkonem 20 W
- Plechová krabice
- Páječka, pájka, pájedlo, metr, štípací kleště, nůž

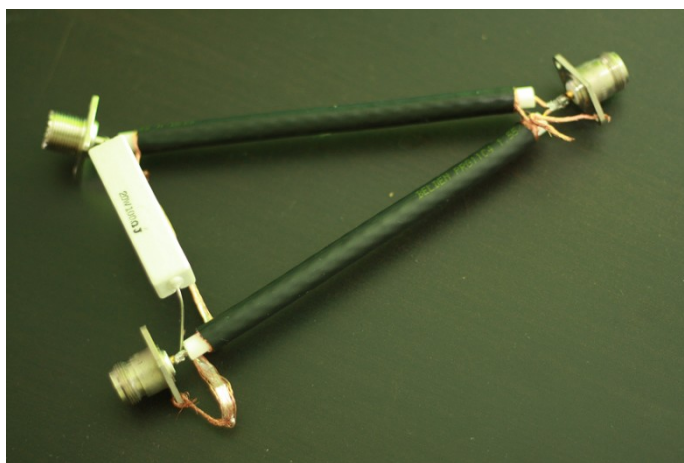
Postup výroby

Z koaxiálního vedení byly ucvaknuty dva kousky, o délce 180 mm. Následně bylo u obou kousků vedení odizolováno z jedné strany 20mm vnější ochrany, a poté byla srolovaná bokem mřížka, která nám tvoří vnější vodič, tato mřížka se neodstraňuje. Pod touto mřížkou je umístěná stínící izolace z měděné fólie. Tato fólie je odstraněna v místě, kde byl odizolován vnější plášť vodiče. Dále zůstává už jen dielektrikum tvořené z PE pěny a vnitřní vodič o průměru 1.55 mm. Odstraní se 15mm dielektrika od okraje vodiče. Dalším krokem bylo změření délky 140mm od odizolovaného pláště vodiče, je velmi důležité, aby délka byla přesně 140 mm, toto místo se označí na vedení a zase odizoluje vnější plášť vodiče. Další kroky byly stejné jako na druhé straně vodiče.

Nyní se dá konec obou vedení k sobě a připájí se společně ke konektoru. Na zbylé dva konce vedení se připájí, na každý zvlášť konektor a k těm se ještě následně připájí rezistor, tak jak je znázorněno na obrázku 2.5. Celé vyrobené reálné zapojení je znázorněno na obrázku 2.6.



Obrázek 2.5: Návrh Wilkinsonova děliče výkonu

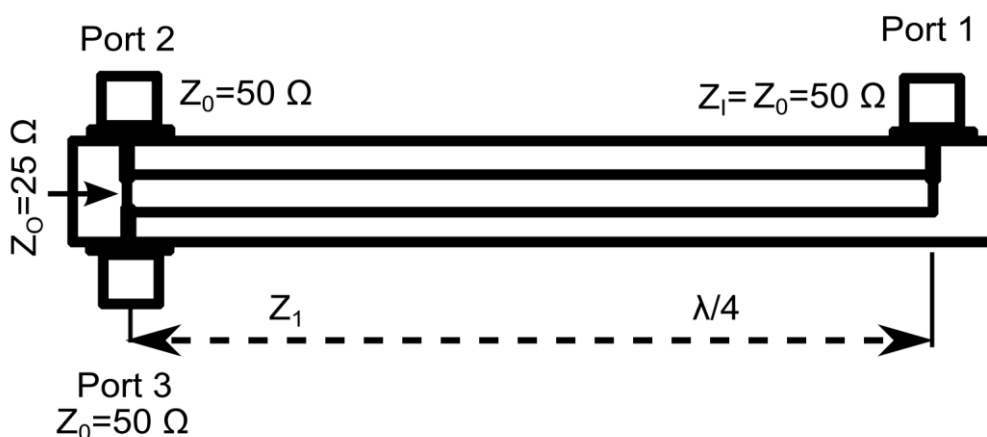


Obrázek 2.6: Foto vyrobeného Wilkinsonova děliče výkonu

2.4 Trubkový dělič signálu

2.4.1 Přenosové vedení obvodu děliče

Tělo trubkového děliče výkonu je konstruováno pomocí kruhové trubky pro vnější vodič a kruhové trubky pro vnitřní vodič. Rozměry těchto trubek tvoří koaxiální impedanční transformaci děliče. Stejně jako v případě koaxiálních kabelů impedanční transformace bude dána délkou $\lambda/4$. Výstupní část se skládá ze dvou výstupních portů zapojených paralelně a jednoho vstupního portu. Na obrázku 2.7 je znázorněn obecný trubcový dělič se dvěma výstupními porty, jedním vstupním portem a tělem děliče. [10] [11]



Obrázek 2.7: Základní zobrazení trubcového děliče se dvěma výstupy(port 2 a 3) a jedním vstupem(port 1)

2.4.2 Návrh trubkového děliče

Cílem diplomové práce je navrhnout tříportový dělič výkonu, který bude pracovat na frekvenci 432 MHz a výkon signálu se bude dělit ve stejném poměru (1:2) na oba výstupní porty.

Základem tohoto výkonového děliče je koaxiální $\lambda/4$ transformátor s porty, které budou zakončeny reálnou charakteristickou impedancí $50\ \Omega$. Pro výpočet ideálního impedančního transformátoru přenosového vedení Z_1 trubkového děliče výkonu byla použita rovnice (2.11) a pro výpočet reálného impedančního transformátoru přenosového vedení Z_1 trubkového děliče výkonu byla použita rovnice (2.12). Impedanční přizpůsobení vedení se provádí z toho důvodu, že vstupní impedance Z_1 je $50\ \Omega$, výstupní impedance portu 2 a 3 je také $50\ \Omega$, ale jelikož jsou paralelně spojeny v jednom bodě, vytváří impedanci $25\ \Omega$, kterou značíme Z_0 . Průměry trubek potřebných pro realizaci vedení jsou vypočteny pomocí rovnice (2.13) pro vnitřní průměr vnějšího vedení a podle rovnice (2.14) pro vnější průměr vnitřního vodiče. Pro výpočet délky vedení použijeme vzorce (2.15) a (2.16).

$$Z_1 = \sqrt{Z_0 \cdot Z_l} = \sqrt{25 \cdot 50} = 35,4 \, \Omega \quad (2.11)$$

$$Z_1 = \frac{138 \cdot \log_{10}\left(\frac{D}{d}\right)}{\sqrt{1+(\epsilon_r-1)}} = \frac{138 \cdot \log_{10}\left(\frac{27}{15}\right)}{\sqrt{1+(1-1)}} = 35,2276 \, \Omega \quad (2.12)$$

$$D = d \cdot 10^{\frac{Z_1 \cdot \sqrt{1+(\epsilon_r-1)}}{138}} = 15 \cdot 10^{\frac{35,4 \cdot \sqrt{1+(1-1)}}{138}} = 27 \, mm \quad (2.13)$$

$$d = \frac{D}{10^{\frac{Z_1 \cdot \sqrt{1+(\epsilon_r-1)}}{138}}} = \frac{27}{10^{\frac{35,4 \cdot \sqrt{1+(1-1)}}{138}}} = 15 \, mm \quad (2.14)$$

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{300 \cdot 10^6}{432 \cdot 10^6} = 0,695 \, m \quad (2.15)$$

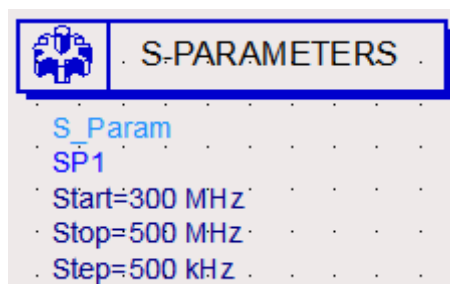
$$l = \frac{\lambda}{4} = \frac{0,695}{4} = 0,174 \, m \quad (2.16)$$

2.4.3 Simulace

Simulace děliče probíhala v programu Advanced Design System. Tento program je elektronický navrhovací program od firmy Keysight Technologies. Program poskytuje integrované vývojové prostředí pro návrhy elektronických výrobků, RF zařízení, satelitní komunikace, bezdrátové sítě a mnoho dalšího.

Postup simulace

Po zpuštění programu bylo zapotřebí jako první krok vytvořit a uložit pracovní stanice pro celý projekt. V této pracovní stanici se poté otevřelo pracovní okno, kde se vytvořil návrh schématu děliče. Schéma trubkového děliče výkonu obsahuje tři zakončovací impedance portů děliče, které nahrazují vedení připojené na dělič. Každá zakončovací impedance má hodnotu impedance 50 Ω . Samotný dělič signálu je ve schématu uveden, jako koaxiální vedení s určitými parametry které jsou uvedené v tabulce 2.3. Následně se propojilo koaxiální vedení se zakončovacemi impedancemi, které se poté uzemnili. Jako poslední věc se v návrhu simulace nastavil rozsah frekvencí, na kterých se dělič v simulaci odměřil za použití rozptylových parametrů. Nastavení je zobrazeno na obrázku 2.8.

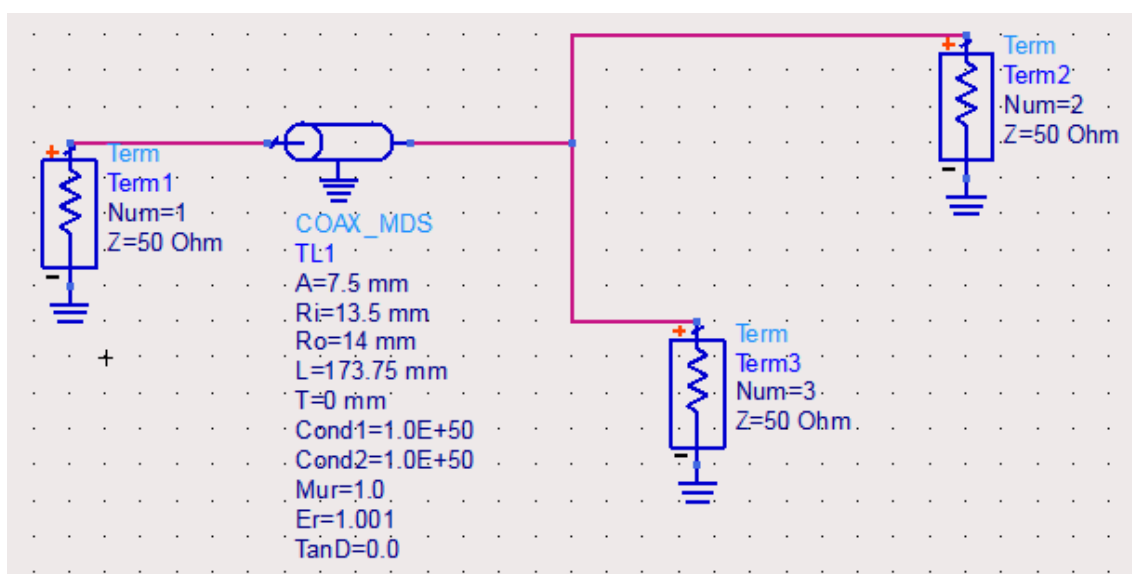


Obrázek 2.8: Nastavení frekvenčního rozsahu simulace děliče

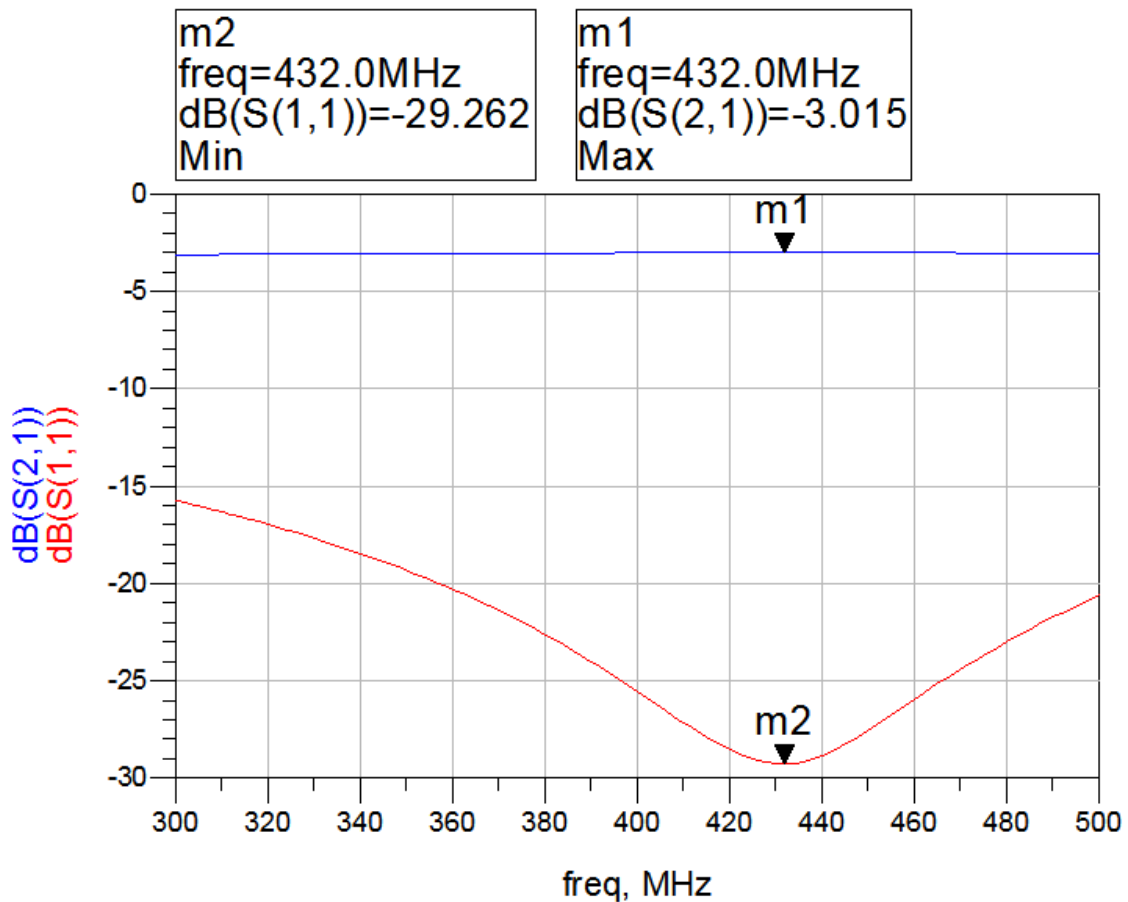
Nyní se zpustí simulace navrhnutého obvodu děliče výkonu a po provedení všech výpočtu se otevřelo další nové okno, kde se zvolí typ grafu a rozptylové parametry děliče signálu, které chceme zobrazit v grafu. Posledním krokem je nastavení ukazatele do grafu pro lepší zjištění a zobrazení hodnot na křivkách v grafu.

Tabulka 2.3: Nastavené parametry pro simulaci trubkového děliče výkonu

Název	Skratka	Hodnota
Vnější poloměr vnitřního vodiče	A	7,5 [mm]
Vnější poloměr vnějšího vodiče	Ri	13,5 [mm]
Vnitřní poloměr vnějšího vodiče	Ro	14 [mm]
Délka vnitřního vedení	L	173,75 [mm]
Dielektrikum	Er	1,001[-]



Obrázek 2.9: Schéma zapojení obvodu v programu ADS pro simulaci děliče

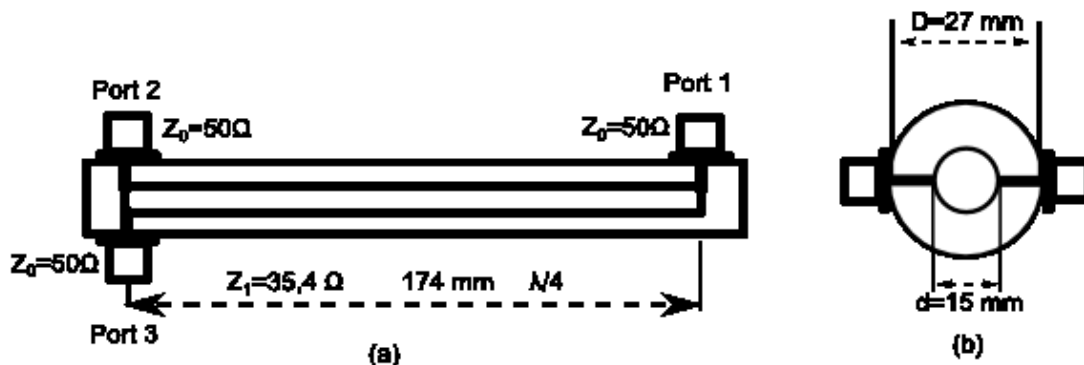


Obrázek 2.10: Výsledný graf simulace trubkového děliče v programu ADS

Na grafu ze simulace trubkového děliče výkonu v programu ADS můžeme vidět dvě křivky. Modrá křivka nám zobrazuje parametr S_{21} , který určuje útlum (přenos) mezi výstupním a vstupním portem (porty 2 a 1). Pokles této křivky o -3 dB znamená, že pokles výkonu na děliči mezi porty 2 a 1 je 50 %, což splňuje požadavek na to, aby dělič dělil výkon v symetrickém poměru 1:2. Jelikož je dělič symetrický tak úplně stejná křivka bude zobrazovat rozptylový parametr S_{31} . Červená křivka znázorňuje rozptylový parametr S_{11} , což je vlastně koeficient odrazu a ukazuje nám frekvenci, na které nám nejlépe dělí navrhnutý trubkový dělič výkonu.

2.4.4 Výroba

V této části diplomové práce se zabývá popisem výroby trubkového děliče výkonu, který byl navržen a od simulován v dřívější části práce. Nachází se zde rozpis potřebných materiálů, součástek a nářadí pro výrobu děliče výkonu a také podrobný postup, který byl aplikován při výrobě děliče.



Obrázek 2.11: Návrh trubkového děliče výkonu znázorněného a) z boku, b) z čela

Materiály, součástky a nářadí pro výrobu děliče

Pro realizaci trubkového děliče výkonu byla zapotřebí řada materiálu a součástek, které jsou popsány v této části práce:

- Měděná trubka délky 215 mm s vnitřním průměrem 27 mm a vnějším průměrem 28 mm.
- Měděná trubka délky 185 mm s vnitřním průměrem 15 mm.
- 3x konektor UHF.
- Pájka, páječka, tavidlo (kalafuna), stojanová vrtačka, vrtáky (1x průměr 3 mm a 1x průměr 14 mm), metr, pilník.

Postup výroby děliče

Celý popis postupu výroby trubkového děliče výkonu si rozdělíme do několika kroků, kterými jsme postupovali při výrobě.

Prvním krokem při výrobě trubkového děliče výkonu bylo potřeba na větší měděnou trubku vyznačit bod a od něj vést kolmici, která je kolmá k okraji trubky. Na ni byla naměřena vzdálenost 174 mm a zaznačen bod. Když byly přesně nalezeny oba středy konců trubky a tyto středy propojily čarou, tak tato čára byla vodorovná s narýsovanou kolmicí na měděné trubce. Zaznačení bodů se provedlo i na další menší měděné trubce.

U druhého kroku se postupovalo tak, že se větší trubka přichytila do svorek na stojanové vrtačce a vyvrtal se v jednom zaznačeném bodě otvor pro zasazení konektoru. Trubka se otočila a vyvrtala se na druhé straně trubky v zaznačeném bodě další otvor pro konektor. Tímto otvorem jsme pokračovali skrz střed trubky a provrtali jsme i na druhé straně otvor pro konektor. Postup vrtání otvorů se opakoval i na menší trubku pouze s tím rozdílem, že se nechala velikost vyvrtaných otvorů pouze rozměrů 3 mm.

Třetím krokem bylo, pomocí pilníku očist a vyhladit všechny otvory, které vznikly po vyvrtání popsaném v předchozím kroku.

Ve čtvrtém kroku se vložila a vycentrovala menší trubky na střed větší trubky. Do vyvrtaných otvorů se vložili konektory typu UHF a konektory správně zapadly do otvorů.

Pátým krokem bylo připájení konektoru ke vnitřní stěně vnitřní trubky. Pro toto pájení se použila pájka s větším výkonem.

Šestým a posledním krokem bylo už pouze upevnění konektorů na vnější část vnější trubky za pomoci samo navrtávacích vrutů.



Obrázek 2.12: *Foto vyrobeného trubkového děliče výkonu*

3 Měření ověření správnosti konstrukce děliče

Hlavním cílem diplomové práce byl návrh, výroba a odměření trubkového děliče výkonu. Je to z toho důvodu, že bez větších potíží zvládá rozdělit velký výkon, který je přivedený na vstup děliče. Proto se celá 4. kapitola zabývá pouze měřením v laboratoři a otestováním v radioklubu našeho vyrobeného trubkového děliče.

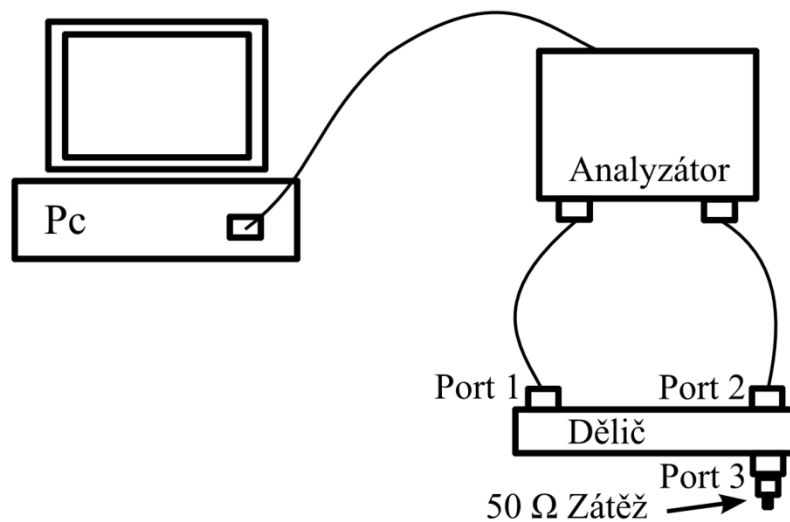
3.1 Měření v laboratoři pomocí vektorového analyzátoru

V laboratorních prostorech Vysoké školy báňské se provedla měření vyrobeného trubkového děliče pomocí vektorového obvodového analyzátoru SDR kits připojeného k počítači s programem určeným přímo k měření s analyzátozem. [8]

Použité přístroje a zařízení

- Vyrobený trubicový dělič výkonu
- Počítač s potřebným softwarem
- Měřicí přístroj SDR Kits (1 kHz - 1.3 GHz) DG8SAQ Vector Network Analyzer v3
- 50 Ω zátěž
- Měřicí kabeláž

Schéma zapojení



Obrázek 3.1: Schéma zapojení pracoviště pro měření trubkového děliče v laboratoři

Postup měření

- Zapnutí PC a připojení analyzátoru pomocí rozhraní USB k PC a spuštění softwaru potřebného k měření.
- Nastavení rozsahu frekvence pro měření a provedení kalibrace analyzátoru společně s kabely použitých k měření.
- Připojení výstupního portu analyzátoru na vstupní port (port 1) děliče a vstupní port analyzátoru na výstupní port (port2) děliče.
- Na druhý výstupní port (port 3) děliče připojíme 50 Ω zátěž.
- Odměřené parametry S_{11} (dB), S_{12} (dB) a PSV děliče.
- Uložené si naměřené hodnoty a grafy.
- Přepojené porty 2 a 3, provedení stejného měření děliče jako pro porty 1 a 2.

Nastavené parametry, naměřené hodnoty

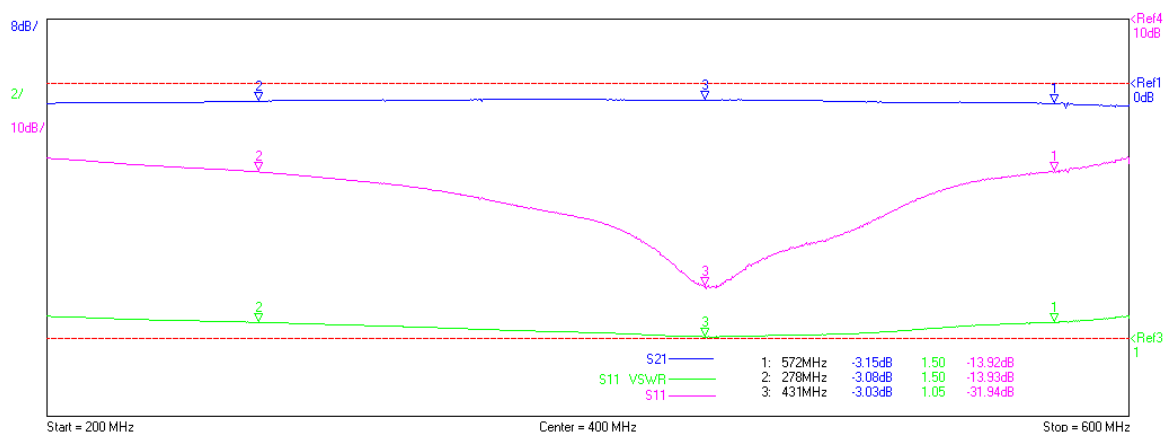
Kalibrace vektorového analyzátoru a měření děliče výkonu proběhlo na frekvenčním rozsahu od frekvence 200 MHz až po frekvenci 600 MHz. Na tomto frekvenčním rozsahu se měřila funkčnost děliče výkonu, zda-li dělič výkonu opravdu rezonuje na požadovaném kmotočtu. Dále se určilo, v jakém frekvenčním rozsahu může být trubkový dělič výkonu použit.

Tabulka 3.1: Naměřené hodnoty vektorovým analyzátozem mezi porty 2 a 1

Ukazatel	Frekvence [MHz]	S_{11} [dB]	S_{11} PSV [-]	S_{21} [dB]
1	572	-13,92	1,50	-3,54
2	278	-13,93	1,50	-3,58
3	431	-31,94	1,05	-3,53
-	432	-31,82	1,06	-3,53

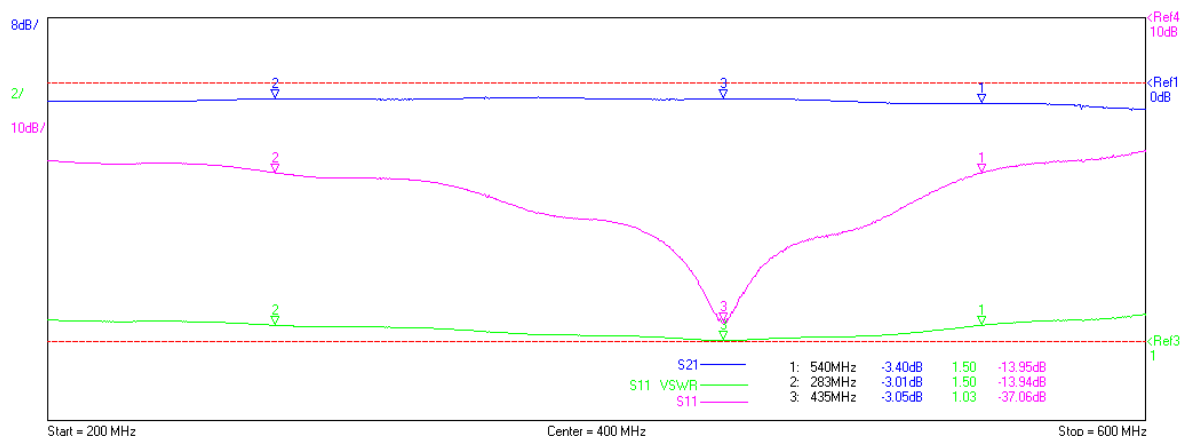
Tabulka 3.2: Naměřené hodnoty vektorovým analyzátozem mezi porty 3 a 1

Ukazatel	Frekvence [MHz]	S_{11} [dB]	S_{11} PSV [-]	S_{31} [dB]
1	540	-13,95	1,50	-4,05
2	283	-13,95	1,50	-3,61
3	435	-37,06	1,03	-3,65
-	432	-35,94	1,07	-3,64



Obrázek 3.2: Výsledný graf měření trubicového děliče mezi portem 2 a portem 1

Na obrázku 3.2 je výsledný graf měření, který byl pořízen pomocí programu a vektorového měřicího zařízení připojeného k PC. Detailní průběh měření je uveden v příloze A.1. Jelikož byl měřicí přístroj pouze dvojportový, měření se prvně provádělo mezi porty 2 a 1. V grafu jsou znázorněny tři křivky, modře znázorněna křivka reprezentuje rozptylová parametr S_{21} . Hodnota parametru S_{21} není přesně -3 dB v bodě, kde by měl dělič rezonovat na požadované frekvenci, ale velmi se této hodnotě blíží. Růžová křivka zobrazuje v grafu parametr S_{11} , který zobrazuje, na které frekvenci dělič rezonuje. Zelená křivka zobrazuje PSV na parametru S_{11} . Graf měření reálného děliče se trochu liší od grafu simulovaného děliče a to je zapříčiněno nepřesností při výrobě. Ještě v grafu můžete vidět tři ukazatele. Ukazatel číslo 1 a 2 zobrazuje mez funkčnost děliče, která byla stanovena pomocí PSV o velikosti 1,50. Ukazatel číslo 3 zobrazuje frekvenci, na které dělič rezonuje.



Obrázek 3.3: Výsledný graf měření trubicového děliče mezi portem 3 a portem 1

Na obrázku 3.3 je výsledný graf měření, který byl pořízen pomocí programu a vektorového měřicího zařízení připojeného k PC. Detailní průběh měření je uveden v příloze A.2. Protože byl měřicí přístroj pouze dvoj portový, měření se prvně provádělo mezi porty 3 a 1. V grafu jsou znázorněny tři křivky. Modře je znázorněna křivka, která reprezentuje rozptylový parametr S_{31} (značeno S_{21} z důvodu, že je vektorový analyzátor pouze dvou portový). Hodnota parametru S_{31} není přesně -3 dB v bodě, kde by měl dělič rezonovat na požadované frekvenci, ale velmi se této hodnotě blíží. Růžová křivka zobrazuje v grafu parametr S_{11} , který zobrazuje, na které frekvenci dělič rezonuje. Zelená křivka zobrazuje PSV na parametru S_{11} . Graf měření reálného děliče se trochu liší od grafu simulovaného děliče a to je zapříčiněno nepřesností při výrobě. V grafu můžete také vidět tři ukazatele. Ukazatel číslo 1 a 2 zobrazuje mez funkčnosti děliče, který byl stanoven pomoc PSV o velikosti 1,50. Ukazatel číslo 3 zobrazuje frekvenci, na které dělič rezonuje.



Obrázek 3.4: Foto měřicího pracoviště při měření s vektorovým analyzátořem v laboratoři

Trubkový dělič výkonu může být používán na frekvenčním rozsahu od 283 MHz do 540 MHz. Tyto mezní frekvence byly určeny stanovením mezní hranice PSV a to konkrétně na hodnotu 1,50. Z toho důvodu nevadí, že vyrobený dělič nerezonuje přesně na frekvenci 432 MHz. Mezi porty 2 a 1 dělič rezonuje na frekvenci 431 MHz a jeho PSV je hodnota 1,05. Rezonanční kmitočet děliče mezi porty 3 a 1 je 435 MHz s PSV hodnotou 1,03.

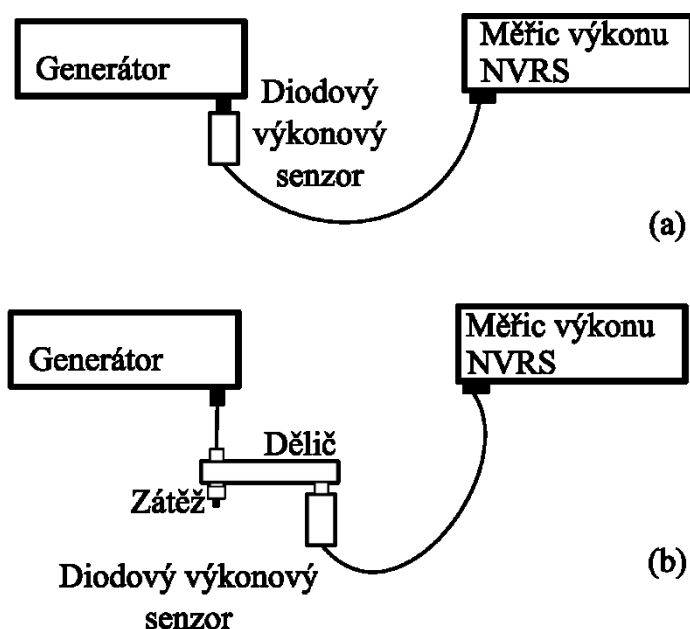
3.2 Měření útlumu

V této části práce je popsáno měření útlumu trubkového děliče výkonu mezi vstupním portem (port 1) a výstupními porty (Port 2 a 3). Můžeme také říct, že jsme proměřili rozptylové parametry děliče výkonu S_{21} a S_{31} .

Použité přístroje a zařízení

- Vyrobený trubkový dělič signálu.
- Rohde & Schwartz signal generátor SMY 01 (9 kHz- 1.040 GHz).
- Rohde & Schwartz (NRVS) Wattmetr s impedancí 50 Ω .
- Diode power sensor NRV-Z2 (10 MHz – 18 GHz).
- 50 Ω zátěž, kabeláž.

Schéma zapojení



Obrázek 3.5: Schéma zapojení – a) Reference, b) proměřování děliče

Postup měření

- Jako první krok se uvedli přístroje do chodu a provedla reference pro 5 frekvencí, které se zvolili v blízkosti kmitočtu, na kterém má pracovat dělič výkonu. Referenci byla provedená podle obrázku 3.5a.
- Všech pět frekvencí bylo proměřeno ve směru od portu 1 do portu 2 a 3. Zapojení pro měření je znázorněno na obrázku 3.5b.
- Byly zaznamenány všechny hodnoty z měření, které jsou uvedené v tabulce 3.3.

Naměřené hodnoty

Tabulka 3.3: Naměřené hodnoty útlumu děliče signálu mezi porty

Frekvence [MHz]	Reference [dBm]	Porty 1 - 2 [dBm]	Porty 1 - 3 [dBm]
410	9,46	6,43	6,53
420	9,44	6,37	6,46
430	9,43	6,34	6,48
432	9,43	6,33	6,5
440	9,42	6,42	6,55

Tabulka 3.4: Vypočtené hodnoty z naměřených hodnot útlumu děliče signálu mezi porty

Frekvence [MHz]	Porty 1 - 2 [dB]	Porty 1 - 3 [dB]
410	3,03	2,93
420	3,07	2,98
430	3,09	2,95
432	3,1	2,93
440	3	2,87

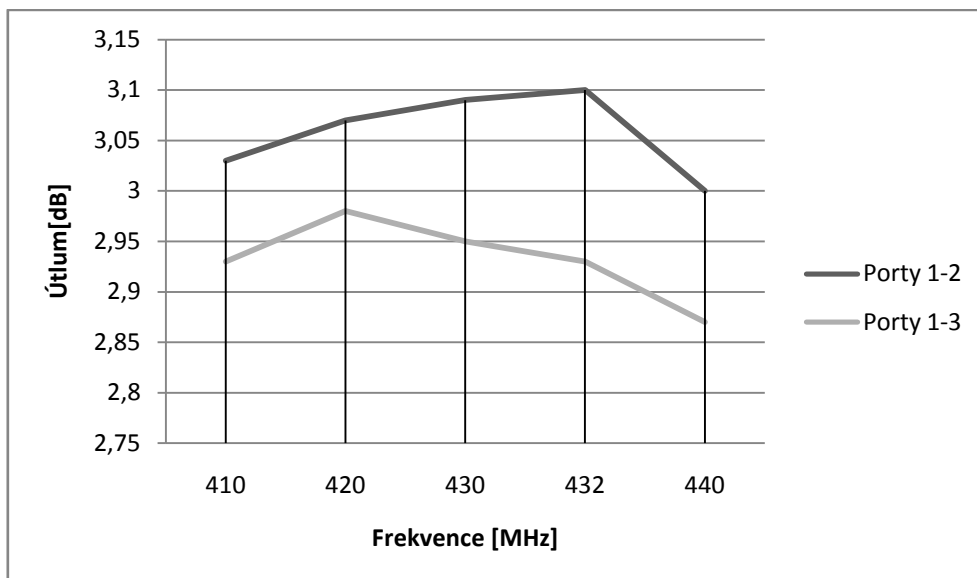
Příklad výpočtu:

Pro vypočtení hodnoty útlumu mezi porty 1 a 2/1 a 3 z naměřených hodnot se vypočte pomocí rovnic (3.1) a (3.2).

Reference [dBm] - naměřená hodnota [dBm] = Hodnota útlumu mezi porty [dB]

$$3,1 = 9,43 - 6,33 \quad [\text{dB}] \quad (3.1)$$

$$2,93 = 9,43 - 6,5 = 2,93 \quad [\text{dB}] \quad (3.2)$$



Obrázek 3.6: Výsledný graf měření útlumu mezi portem 1 a porty 2 a 3



Obrázek 3.7: Foto měřicího pracoviště při měření útlumu

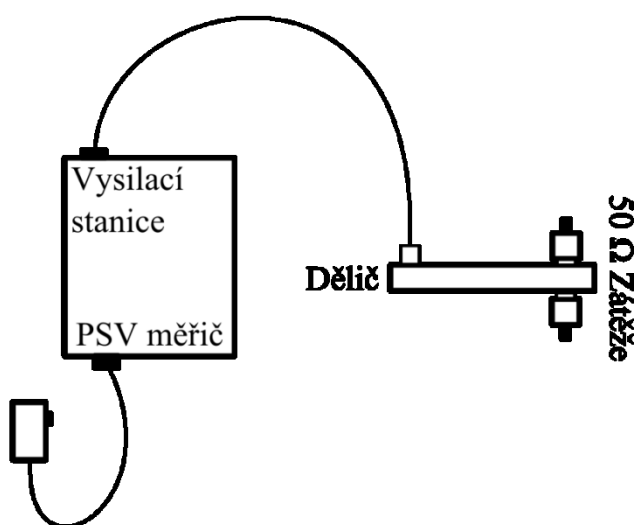
3.3 Měření trubkového děliče výkonu v radioklubu

Pro ověření správné funkčnosti trubkového děliče výkonu bylo provedeno měření v radioklubu OK2KQM & OK6A, který se nachází v prostorách Vysoké školy báňské - Technické univerzity Ostrava. Zde jsme provedli dvě měření. První měření bylo provedeno na trubkovém děliči, který měl výstupní porty (porty 2 a 3) zatížené $50\ \Omega$ zátěžemi. K měření posloužila vysílací stanice typu YAESU FT 817, pomocí které bylo provedeno měření poměru stojatých vln (PSV) na trubkovém děliči výkonu. Druhým měřením bylo odzkoušení děliče připojeného výstupy na dvě antény pracující na pásmu 70 cm za použití vysílací stanice YAESU FT 847. [13][14]

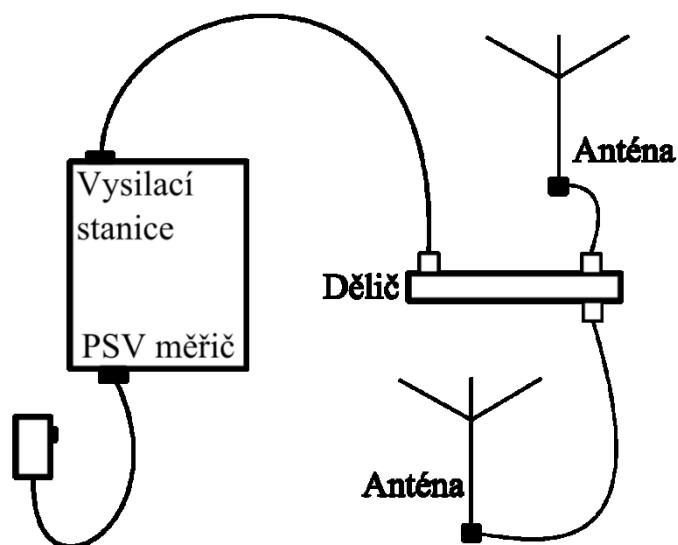
Použité přístroje a zařízení

- Vyrobený trubkový dělič výkonu.
- Dvě $50\ \Omega$ zátěže.
- Vysílací stanice YAESU FT 817 / YAESU FT 847.
- Dvě antény Diamond X-200.
- Kabeláž potřebná k měření.

Schéma zapojení



Obrázek 3.8: Schéma zapojení trubkového děliče výkonu pro změření PSV



Obrázek 3.9: Schéma zapojení trubkového děliče výkonu k anténám

Postup měření děliče v radioklubu

Pro první část měření, kde jsou oba dva výstupy (port 2 a 3) trubkového děliče výkonu zatížené $50\ \Omega$ zátěží se postupovalo následně:

- Vysílací stanice byla připojena za použití $50\ \Omega$ koaxiálního vedení na vstupní port (port 1) děliče a na výstupní porty byly připojeny $50\ \Omega$ zátěže, které nám nahrazovaly $50\ \Omega$ vedení.
- Druhým krokem při měření bylo za úkol proměřit PSV na frekvenci 432 MHz a přilehlých frekvencích kolem této frekvence, na které by měl mít trubkový dělič výkonu nejnižší hodnotu PSV.
- Jelikož vysílací stanice nebyla odblokovaná, na jiný frekvenční rozsah než 420 - 470 MHz, tak se měření provádělo pouze v tomto frekvenčním rozsahu. Frekvenční rozsah nijak neomezil naše měření.
- K proměření děliče a určení PSV byly zvoleny tyto frekvence 420, 425, 430, 432, 435, 440, 450, 460, 470 MHz.
- Veškeré měření pomocí vysílací stanice bylo pouze informativní, jelikož se PSV určoval z čtverečkového indikátoru na vysílací stanici.

Pro druhou část měření, kde jsou oba dva výstupy (port 2 a 3) trubkového děliče výkonu připojeni na antény byl postup následující:

- Vysílací stanice se připojila za pomoci $50\ \Omega$ koaxiálního vedení na vstupní port (port 1) děliče a na výstupní porty bylo připojeno $50\ \Omega$ koaxiální vedení, které se připojilo k anténám.

- Druhým krokem při měření bylo za úkol odzkoušet trubkový dělič výkonu na frekvenci 432 MHz za reálného provozu v radioklubu OK2KQM & OK6A.
- K výstupním portům koaxiálního vedení trubkového děliče výkonu, byly připojeny k anténám. Na vstupní port děliče byla připojena vysílací stanice.
- Na vysílací stanici YAESU FT 847 se nastavila frekvence 432 MHz a pomalu se zvyšoval výkon k požadovanému výkonu 500 W.
- Dělič byl testován hodinu a deset minut pod tímto zatížením.

Naměřené hodnoty

Měření děliče za použití vysílací stanice YAESU FT 817 a orientační určení PSV pomocí čtverečkového indikátoru na vysílací stanici v rozsahu 420 - 470 MHz proběhlo podle předpokladu. Bylo zde naměřeno velmi nízké PSV, jelikož už podle dřívějšího měření v laboratoři za použití vektorového analyzátoru jsme zjistili, že trubkový dělič výkonu splňuje velikost PSV do 1,50 ve frekvenčním rozsahu od frekvence 283 MHz do frekvence 540 MHz.

Druhým měřením v radioklubu OK2KQM & OK6A, který se nachází v kampusu Vysoké školy báňské, se odzkoušelo, zda-li trubkový dělič vydrží reálný provoz v praxi. Dělič byl testován hodinu a deset minut pod výkonem 500 W a během provozu se nevyskytly žádné problémy s tímto námi vyrobeným děličem.



Obrázek 3.10: Foto měření PSV pomocí vysílací stanice YAESU FT 817



Obrázek 3.11: Foto měření PSV pomocí vysílací stanice YAESU FT 847

3.4 Souhrnné vyhodnocení provedených měření

S trubkovým děličem výkonu bylo provedeno množství měření, která měla ověřit správnou funkčnost děliče.

První měření bylo provedeno za použití vektorového obvodového analyzátoru, připojeného k PC, na kterém je nainstalován potřebný program k měření. Jelikož je analyzátor pouze dvou portový a dělič je tří portový, muselo se provádět zvlášť měření mezi porty 2 a 1 a mezi porty 3 a 1. Pomocí tohoto analyzátoru se měřili rozptylové parametry vyrobeného trubkového děliče výkonu. První měřený rozptylový parametr děliče byl S_{11} což je koeficient odrazu na vstupním portu. Díky tomuto rozptylovému parametru S_{11} jsme mohli z grafu vyčíst rezonanční frekvenci děliče, která udávají, na které frekvenci dělí dělič přivedený výkon. Měření mezi porty 2 a 1 ukázalo, že dělič dělí přivedený signál na frekvenci 431 MHz a měření mezi porty 3 a 1 zjistilo, že dělič dělí přivedený signál na frekvenci 435 MHz. Tato lehká odchylka od požadované frekvence 432 MHz byla způsobená nepřesnou výrobou v domácích podmínkách, ale tato nepřesnost děliče vůbec nevadí, jelikož druhou křivkou vyznačenou v grafu udává hodnota PSV rozptylového parametru S_{11} . Mezní hranice pro použitelnost děliče byla stanovena na hodnotu PSV 1,50. Stanovením této hranice jsme zjistili, že dělič

je použitelný ve frekvenčním rozsahu od 283 MHz do 530MHz. Hodnota PSV na požadovaném kmitočtu 432 MHz byla při měření mezi porty 2 a 1 1,06 a při měření mezi porty 3 a 1 byla tato hodnota 1,07. Poslední dva měřené rozptylové parametry měřené vektorovým obvody analyzátozem jsou S_{21} a S_{31} , které udávají pokles signálu mezi výstupním a vstupním portem děliče. V ideálním případě by měly být tyto obě hodnoty -3 dB parametrů S_{21} a S_{31} , aby byl dělič symetrický a dělil přesně v poměru 1:2. V našem případě hodnoty jsou lehce posunuté, ale to posunutí od požadovaného výsledku je velmi malé, tak můžeme tento dělič považovat za symetrický.

Druhé měření proběhlo za použití Rohde & Schwartz signal generátoru SMY 01, Rohde & Schwartz Wattmetr s impedancí 50 Ω a diode power sensor NRV-Z2 pomocí kterých jsme si ověřovali již dříve zjištěné rozptylové parametry S_{21} a S_{31} . Měřil se útlum mezi vstupním a výstupním portem. Proměřilo se zde několik hodnot, ze kterých se poté vytvořila tabulka a z ní následně graf. Hodnoty útlumu naměřené na frekvenci 432 MHz nejsou přesně 3 dB, tak jak je požadováno pro symetrický dělič. Hodnoty jsou lehce posunuty, co může být zapříčiněno nepřesnou výrobou, nebo nepřesností při měření. Hodnoty se od požadovaného útlumu liší velmi málo. Hodnota útlumu mezi porty 2 a 1 je 3,1 dB a hodnota útlumu mezi porty 3 a 1 je 2,93 dB. Tato lehká odchylka od požadovaných 3dB nevadí, a lze dělič považovat za symetrický.

Ve třetím měření byl dělič už testován pomocí vysílacích stanic. První testování proběhlo se stanicí YAESU FT 817 kterou se ověřila použitelnost děliče, který byl zatížen na výstupech 50 Ω zátěžemi. Druhé testování děliče už proběhlo na vysílací stanice YAESU FT 847, kde byly k trubkovému děliči výkonu připojeny dvě antény, pracující na 70 cm pásmu. Tímto třetím měřením byla ověřena správnost funkce vyrobeného trubkového děliče výkonu při reálném provozu v radioklubu.

Závěr

Hlavním cílem této diplomové práce bylo zkonstruovat dělič výkonu, který bude splňovat parametry zadané radioklubem OK2KQM & OK6A.

Prvním krokem před samotným započítáním návrhu a výroby děliče výkonu, byla potřeba nastudovat odbornou literaturu zabývající se různými typy děličů. Tato teorie byla poté sepsána v první části práce.

Po nastudování a sepsání teorie se přistoupilo k návrhu samotného děliče výkonu. Pro návrh děličů jsme si vybrali dva konkrétní typy a to jako první Wilkinsonův dělič výkonu a trubkový dělič výkonu. Konstrukční návrh děliče výkonu měl být realizován ze snadno dostupných materiálů, které jsou vhodné pro realizaci děliče splňující zadané podmínky.

Pro Wilkinsonův dělič výkonu byl zvolen koaxiální typ vedení, který snese požadovaný výkon přivedený na vstup děliče a impedance vedení je nejbližší požadované impedanci určené výpočtem. Požadovaná impedance vedení je $70,71 \Omega$ a impedance koaxiálního vedení je 75Ω . Konkrétně byl zvolený typ koaxiálního vedení PRG 11 CU PVC. Pro správný návrh konstrukce děliče je zapotřebí znát tři základní parametry vedení a to vnější průměr vnitřního vodiče, vnitřní průměr vnějšího vodiče a hodnotu dielektrika mezi vnitřním a vnějším vodičem. Průměry vodičů byly zjištěny z katalogového listu našeho koaxiálního vedení, ale přesnou hodnotu dielektrika bylo zapotřebí zjistit za pomoci měření.

Pro návrh trubkového děliče výkonu bylo využito dvou měděných trubek (vnější a vnitřní vodič). Dielektrikum je v tomto případě vzduch. Požadovaná impedance transformačního přenosového vedení trubkového děliče po výpočtech je $35,4 \Omega$ a za použití vhodných rozměrů průměru vnějšího a vnitřního vodiče jsme byli schopni se přiblížit velmi blízko této hodnotě a to konkrétně na hodnotu $35,2 \Omega$.

Před samotnou realizací výroby děličů bylo potřeba si ověřit správnost konstrukčního návrhu a to se provedlo pomocí simulace děličů v programu Advanced Design System (ADS), ve kterém lze nastavit velmi přesně požadované parametry navržených konstrukcí děličů výkonu. Po provedení simulací jsme zjistili, že navržené děliče splňují zadané požadavky. Nyní po zjištění správné funkčnosti děličů pomocí simulací se mohlo přistoupit k jejich samotné výrobě.

Samotné měření poté probíhalo už pouze na trubkovém děliči výkonu z toho důvodu, že splňoval nejlépe požadované podmínky pro používání v praktickém provozu v radioklubu OK2KQM & OK6A. Na tomto děliči výkonu se provedla celá řada měření a výsledky měření jsou takové, že vyrobený trubkový dělič splňuje zadané požadavky na výrobu. I když jeho rezonanční frekvence není nikdy přesně požadovaných 432 MHz. Měření mezi porty 1 a 2 ukázalo, že rezonanční frekvence je 431 MHz a měření mezi porty 1 a 3 má rezonanční frekvenci 435 MHz. Je to zapříčiněno nepřesnou výrobou děliče výkonu. V domácích podmínkách výroby děliče výkonu jsme se, ale přiblížili velmi blízko potřebného kmitočtu. Takle nepřesnost při výrobě vůbec nevadí, jelikož jsme měřením zjistili, že dělič je použitelný

ve frekvenčním rozsahu od 283 MHz do 530 MHz. Mezní hranice použitelnosti byla stanovena pomocí parametru PSV, které nesmělo překročit hodnotu 1,50.

Trubkový dělič výkonu byl také otestován na reálném provozu v radioklubu OK2KQM & OK6A kde bylo zjištěno, že dělič opravdu splňuje požadované parametry a je ho možné zařadit mezi zařízení používaná v radioklubu.

Úkolem diplomové práce bylo reálně vytvořit dělič výkonu, který bude schopný snášet velký výkon. K tomu vytvořit dokumentaci návrhu děliče, simulaci děliče, popis výroby děliče, odměření a ověření funkčnosti děliče výkonu v radioklubu.

Použitá literatura

- [1] POZAR, David M. *Microwave engineering*. 4th ed. Hoboken, NJ: Wiley, c2012, xvii, 732 p. ISBN 0470631554.
- [2] JOINES, William T, W PALMER a Jennifer Lyn Truman BERNHARD. *Microwave transmission line circuits*. Boston: Artech House, [2013], 1 online zdroj (317 pages). ISBN 978-1-60807-570-6.
- [3] CHANG, Kai. *RF and microwave wireless systems*. New York: Wiley, 2000, xvi, 339 p. ISBN 0471351997.
- [4] BALANIS, Constantine A. *Antenna theory: analysis and design*. 3rd ed. Hoboken, NJ: John Wiley, c2005, xvii, 1117 p. ISBN 047166782x.
- [5] DVORSKÝ, Marek. Moodle-Radiokomunikační technika I. Měření zkracovacího součinitele v kabelu. [online]. 2015 [cit. 2015-05-01]. Dostupné z: http://comtech.vsb.cz/moodle/pluginfile.php/708/mod_resource/content/7/m2-velocity.pdf
- [6] Microwaves101.com: S-parameters. *Microwaves101.com* [online]. [cit. 2015-05-01]. Dostupné z: <http://www.microwaves101.com/encyclopedias/438-s-parameters-microwave-encyclopedia-microwaves101-com>
- [7] SORRENTINO, Roberto a Giovanni BIANCHI. *Microwave and RF engineering*. Hoboken, N.J.: Wiley, 2010, xix, 892 p.
- [8] BAIER, Tom. *This help file covers the hardwares VNWA2 with firmware version 4.15 and VNWA3 with firmware version 5.16 and VNWA Software version 35.9.b* [online]. 2015 [cit. 2015-05-01]. Dostupné z: http://sdr-kits.net/DG8SAQ/VNWA/VNWA_HELP.pdf
- [9] MALORATSKY, Leo G. *Passive RF & microwave integrated circuits*. Boston: Elsevier/Newnes, 2004, xv, 368 p. ISBN 075067699x.
- [10] Rfcafe.com: Transmission Line Equations. [online]. [cit. 2015-05-01]. Dostupné z: <http://www.rfcafe.com/references/electrical/transmission-lines.htm>
- [11] Qsl.net: Stacking with homemade Power Splitters (DK7ZB). [online]. [cit. 2015-05-01]. Dostupné z: <http://www.qsl.net/dk7zb/Stacking/splitter.htm>
- [12] Shelvin: Elektronik ausprobiert und erläutert. [online]. [cit. 2015-05-01]. Dostupné z: <http://shelvin.de/der-wilkinson-teiler/>
- [13] YAESU FT 817 OPERATING MANUAL: HF/VHF/UHF ALL MODE TRANSCEIVER. [online]. [cit. 2015-05-01]. Dostupné z: http://www.fracassi.net/iw2ntf/manuali/FT-817_OM.pdf

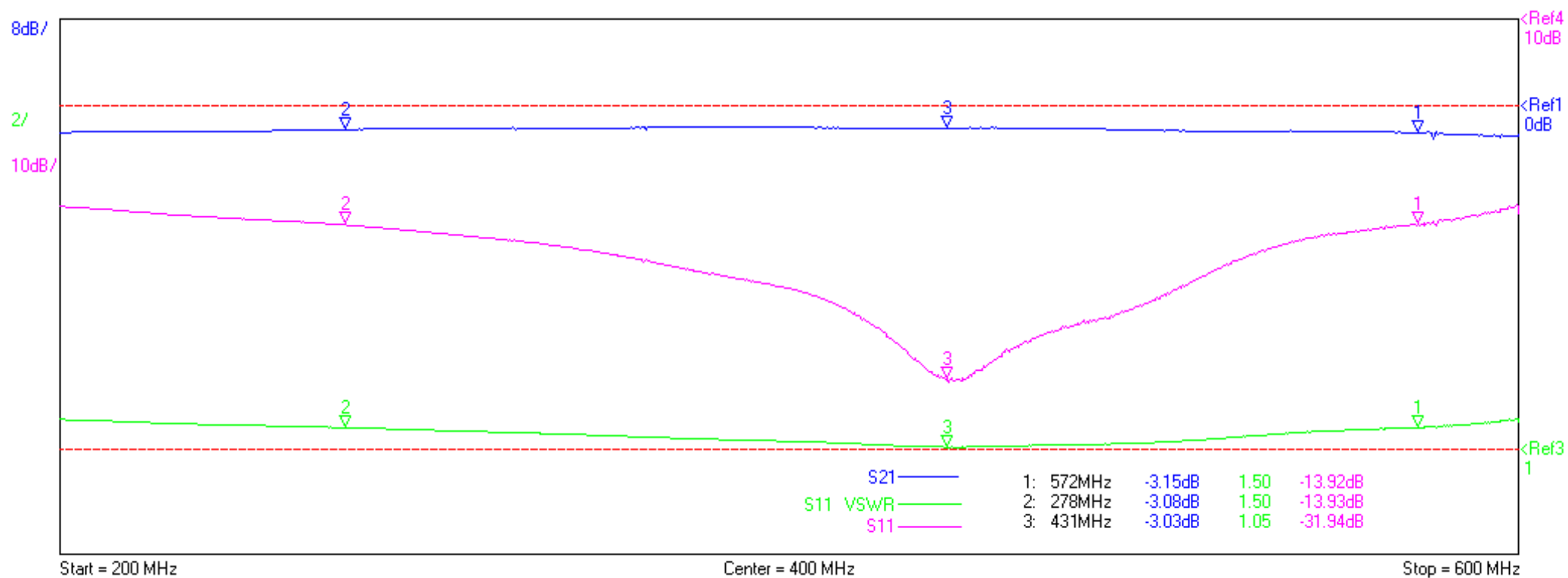
[14] YAESU FT 847 OPERATING MANUAL [online]. [cit. 2015-05-01]. Dostupné z: http://students.iitk.ac.in/hamclub/operating%20manual_ft-847.pdf

Seznam příloh

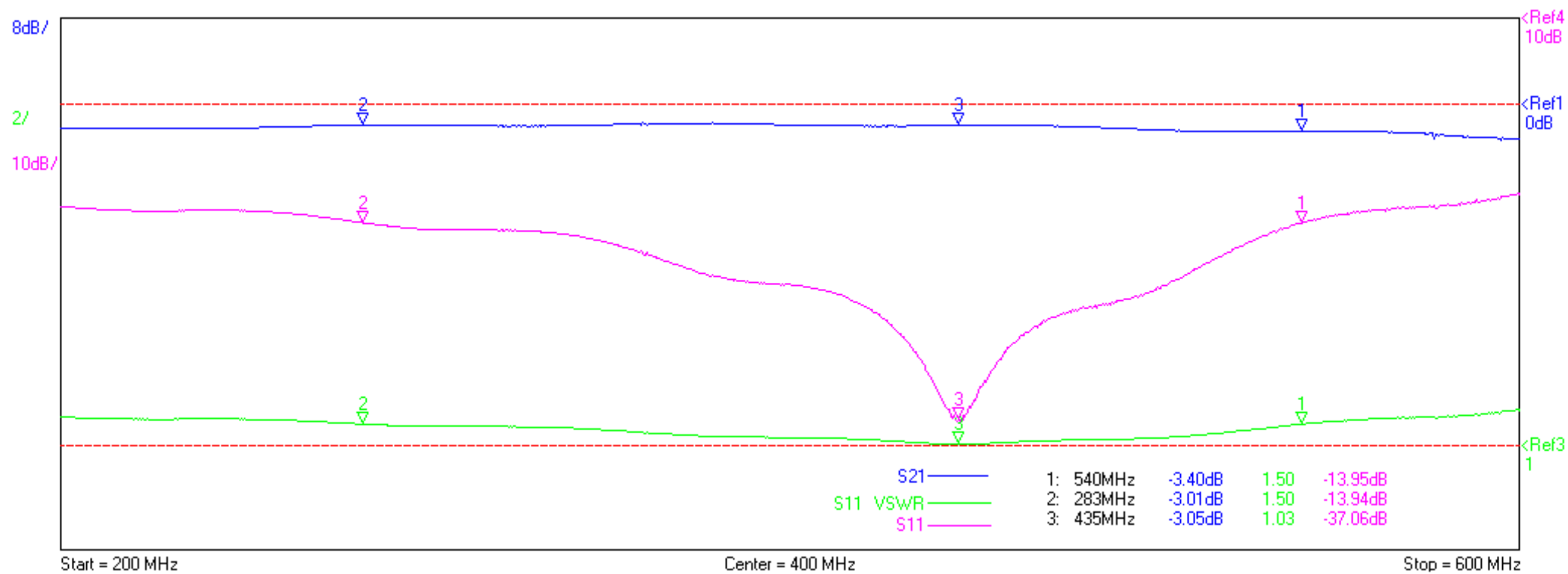
Příloha A:	Grafy měření trubkového děliče výkonu	lix
Tabulka A.1:	Výsledný graf měření trubicového děliče mezi portem 2 a portem 1	lix
Tabulka A.2:	Výsledný graf měření trubicového děliče mezi portem 3 a portem 1	lx
Příloha B:	Foto trubkového děliče výkonu.....	lxi

Příloha A: Grafy měření trubkového děliče výkonu

Tabulka A.1: Výsledný graf měření trubcového děliče mezi portem 2 a portem 1



Tabulka A.2: Výsledný graf měření trubicového děliče mezi portem 3 a portem 1



Příloha B: *Foto trubkového děliče výkonu*

Tabulka B.1: Měření trubkového děliče výkonu vektorovým obvodovým analyzérem



Tabulka B.2: Měření trubkového děliče výkonu zatížený 50 Ω zátěžemi

